OCTAVA EDICIÓN

Biología

LA VIDA EN LA TIERRA

PEARSON Prentice Hall ®

AUDESIRK AUDESIRK BYERS

VISIT…

Biología

LA VIDA EN LA TIERRA

OCTAVA EDICIÓN

Teresa Audesirk
University of Colorado at Denver and Health Science Center

Gerald Audesirk
University of Colorado at Denver and Health Science Center

Bruce E. Byers
University of Massachusetts, Amherst

TRADUCCIÓN

Augusta Victoria Flores Flores
Traductora profesional

REVISIÓN TÉCNICA

Vicente Gerardo Hernández Hernández
Preparatoria de la Universidad La Salle

Paula Cortés García
Colegio Gimnasio del Norte
Bogotá, Colombia

Víctor Hugo Blanco Lozano
ITESM Campus Puebla

PEARSON Educación ®

Datos de catalogación bibliográfica

AUDESIRK TERESA; AUDESIRK GERALD; BYERS, BRUCE E.
Biología: La vida en la Tierra

Pearson Educación de México, 2008

ISBN 978-970-26-1194-3
Área: Ciencias

Formato 21 × 27 Páginas: 1024

Authorized translation from the English Language edition, entitled *Biology: Life on earth with physiology, 8th Edition* by *Teresa Audesirk, Gerald Audesirk and Bruce E. Byers*, published by Pearson Education Inc., publishing as PRENTICE HALL INC., Copyright ©2008. All rights reserved.
Versión en español de la obra titulada *Biology: Life on earth with physiology, 8ª edición,* de *Teresa Audesirk, Gerald Audesirk y Bruce E. Byers*, publicada originalmente en inglés por Pearson Education Inc., publicada como PRENTICE HALL INC., Copyright ©2008. Todos los derechos reservados.

ISBN 0-13-195766-X

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Editor:	Enrique Quintanar Duarte
e-mail:	enrique.quintanar@pearsoned.com
Editor de desarrollo:	Felipe Hernández Carrasco
Supervisor de producción:	Rodrigo Romero Villalobos

OCTAVA EDICIÓN, 2008

D.R. © 2008 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
Atlacomulco Núm. 500, 5° Piso
Col. Industrial Atoto
53519, Naucalpan de Juárez, Edo. de México

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. Núm. 1031

Prentice Hall es una marca registrada de Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.

ISBN 10: 970-26-1194-6
ISBN 13: 978-970-26-1194-3

Impreso en México. *Printed in Mexico.*
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 11 10 09 08

PEARSON Educación

Edición en inglés

Editor: Jeff Howard
Development Editor: Anne Scanlan-Rohrer
Production Editor: Tim Flem/PublishWare
Media Editor: Patrick Shriner
Executive Managing Editor: Kathleen Schiaparelli
Editor in Chief of Development: Carol Trueheart
Media Production: nSight
Managing Editor, Science Media: Rich Barnes
Director of Marketing: Patrick Lynch
Marketing Assistant: Jessica Muraviov
Director of Creative Services: Paul Belfanti
Creative Director: Juan Lopez
Art Director: John Christiana
Interior Design: Maureen Eide
Cover Designers: Maureen Eide and John Christiana
Page Composition: PublishWare
Manufacturing Manager: Alexis Heydt-Long
Buyer: Alan Fischer
Senior Managing Editor, Art Production and Management: Patricia Burns
Manager, Production Technologies: Matthew Haas
Managing Editor, Art Management: Abigail Bass
Art Development Editor: Jay McElroy
Art Production Editor: Rhonda Aversa
Manager, Art Production: Sean Hogan
Assistant Manager, Art Production: Ronda Whitson
Illustrations: ESM Art Production; Lead Illustrators: Daniel Knopsnyder, Stacy Smith, Nathan Storck; Imagineering; Stephen Graepel
Cartographer: GeoNova, LLC
Assistant Managing Editor, Science Supplements: Karen Bosch
Editorial Assistant: Gina Kayed
Production Assistant: Nancy Bauer
Director, Image Resource Center: Melinda Reo
Manager, Rights and Permissions: Zina Arabia
Interior Image Specialist: Beth Boyd Brenzel
Cover Image Specialist: Karen Sanatar
Image Permission Coordinator: Debbie Latronica
Photo Researcher: Yvonne Gerin
Cover Photograph: Rockhopper Penguins; The Neck, Saunders Island, Falkland Islands, by Laura Crawford Williams

Resumen de Contenido

1 Introducción a la vida en la Tierra 1

UNIDAD 1 La vida de una célula 19

2 Átomos, moléculas y vida 20
3 Moléculas biológicas 36
4 Estructura y función de la célula 56
5 Estructura y función de la membrana celular 80
6 Flujo de energía en la vida de una célula 100
7 Captación de energía solar: Fotosíntesis 116
8 Obtención de energía: Glucólisis y respiración celular 132

UNIDAD 2 Herencia 147

9 DNA: La molécula de la herencia 148
10 Expresión y regulación de los genes 166
11 La continuidad de la vida: Reproducción celular 190
12 Patrones de herencia 220
13 Biotecnología 250

UNIDAD 3 Evolución y diversidad de la vida 275

14 Principios de la evolución 276
15 Cómo evolucionan los organismos 294
16 El origen de las especies 314
17 Historia de la vida 330
18 Sistemática: Búsqueda de orden en medio de la diversidad 356
19 La diversidad de los procariotas y los virus 370
20 La diversidad de los protistas 386
21 La diversidad de las plantas 402
22 La diversidad de los hongos 422
23 Diversidad animal I:Invertebrados 440
24 Diversidad animal II: Vertebrados 468

UNIDAD 4 Comportamiento y ecología 487

25 Comportamiento animal 488
26 Crecimiento y regulación de las poblaciones 512
27 Interacciones de la comunidad 536
28 ¿Cómo funcionan los ecosistemas? 558
29 Los diversos ecosistemas de la Tierra 580
30 Conservación de la biodiversidad de la tierra 610

UNIDAD 5 Anatomía y fisiología de los animales 633

31 Homeostasis y organización del cuerpo animal 634
32 Circulación 648
33 Respiración 668
34 Nutrición y digestion 684
35 El sistema urinario 706
36 Defensas contra la enfermedad 720
37 Control químico del organismo animal: El sistema endocrino 740
38 El sistema nervioso y los sentidos 760
39 Acción y sostén: Los músculos y el esqueleto 796
40 Reproducción animal 814
41 Desarrollo animal 836

UNIDAD 6 Anatomía y fisiología de las plantas 857

42 Anatomía de las plantas y transporte de nutrimentos 858
43 Reproducción y desarrollo de las plantas 886
44 Respuestas de las plantas al ambiente 908

Ensayos

GUARDIÁN DE LA TIERRA

¿Por qué devemos preservar la biodiversidad? 12
Especies en peligro de extinción: De la poza génica a los "charcos de genes" 308
Hibridación y extinción 322
El caso de las setas que desaparecen 435
Ranas en peligro 476
¿Hemos excedido la capacidad de carga de la Tierra? 528
Especies invasoras trastornan las interacciones de la comunidad 541
Las sustancias tóxicas se acumulan a lo largo de las cadenas alimentarias 566
Los polos en peligro 576
El agujero de ozono, una abertura en nuestro escudo protector 586
Restauración de los Everglades 616
Problemas intrincados: Tala, pesca y cacería furtiva 618
En defensa de las tortugas marinas 621
Recuperación de un depredador clave 624
Preservación de la biodiversidad con café cultivado a la sombra 629
Engaño endocrino 754
Las plantas ayudan a regular la distribución del agua 878
Dodós, murciélagos y ecosistemas perturbados 898

GUARDIÁN DE LA SALUD

El colesterol, aliado y enemigo 47
¿Por qué aumentamos de peso si ingerimos azúcar? 144
Sexo, envejecimiento y mutaciones 184
Cáncer, división celular mitótica descontrolada 208
Diagnóstico genético prenatal 268
Al rescate de los corazones enfermos 654
Fumar: una decisión de vida 678
Cuando se antoja una hamburguesa con queso 687
Las úlceras digieren el tracto digestivo 699
Cuando los riñones fallan 714
El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar? 734
Drogas, enfermedades y neurotransmisores 769
Como se repara un hueso fracturado 808
Osteoporosis: Cuando los huesos se vuelven quebradizos 810
Enfermedades de transmisión sexual 828
Reproducción con alta tecnología 831
La placenta sólo brinda una protección parcial 852
¿Eres alérgico al polen? 890

DE CERCA

Un asunto peliagudo 52
Quimiósmosis, la síntesis de ATP en los cloroplastos 124
Glucólisis 136
Reacciones de la matríz mitocondrial 141
Estructura y duplicación del DNA 159
La síntesis de proteínas, un asunto de alta energía 180
El principio de Hardy-Weinberg 298
Especiación por mutación 326
Reconstrucción de los árboles filogenéticos 362
¿Cómo se replican los virus? 382
Las branquias y los gases: Un intercambio contracorriente 674
Las nefronas y la formación de orina 712
Los iones y las señales eléctricas en las neuronas 766
El control hormonal del ciclo menstrual 826
¿Cómo absorben agua y minerales las raíces? 874

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Experimentos controlados, antes y ahora 6
La radiactividad en la investigación 24
En busca de la célula 64
El descubrimiento de las acuaporinas 89
El DNA es la molécula de la herencia de los bacteriófagos 152
El descubrimiento de la doble hélice 156
El RNA ya no es sólo un mensajero 183
Copias al carbón, la clonación en la naturaleza y en el laboratorio 202
Fibrosis quística 234
Aguas termales y la ciencia del calor 256
Charles Darwin: La naturaleza era su laboratorio 282
¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil? 338
La genética molecular pone al descubierto las relaciones evolutivas 365
Hormigas y acacias: Una asociación ventajosa 549
El descubrimiento de las vacunas 732
Neuroimágenes: Una mirada al interior de la "caja negra" 780
En busca de un anticonceptivo masculino 832
La promesa de las células madre 843
¿Cómo se descubrieron las hormonas vegetales? 912

GUARDIÁN DE LA BIOTECNOLOGÍA

Arroz dorado 267

ENLACES CON LA VIDA

La vida que nos rodea 14
¿Alimentación saludable? 29
¿Alimentos sintéticos? 41
Huéspedes indeseables 77
La falta de una enzima produce intolerancia a la lactosa 113
Tú vives gracias a las plantas 129
Un tarro de vino, una rebanada de pan y un tazón de col agria 139
Genética, evolución y medicina 178
Biotecnología, de lo sublime a lo ridículo 266
Los nombres científicos y la vanidad 328
Un mundo pequeño 367
Comensales indeseables 378
Recolecta con cuidado 436
Ayudantes de cirujanos 454
¿Los animales pertenecen a los laboratorios? 483
Pisar ligeramente: ¿Qué tan grande es tu "huella"? 533
Es posible hacer una diferencia 577
¿Disfrutar del chocolate y salvar selvas tropicales? 591
¿Qué pueden hacer los individuos? 630
¿Calor o humedad? 637
Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores 680
¿Demasiado líquido para beber? 717
Más cerca de la cura de la diabetes 756
Caminar con un perro 811
¿Por qué el parto es tan difícil? 854

CONEXIONES EVOLUTIVAS

Patas del caribú y diversidad de membranas 96
Los científicos no ponen en duda la evolución 326
Nuestros ancestros unicelulares 400
El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos 435
¿Los seres humanos son un éxito biológico? 482
¿Por qué juegan los animales? 508
¿El camuflaje es capaz de dividir una especie? 554
La evolución de las hormonas 756
Sentidos poco comunes 790
Adaptaciones especiales de raices, tallos y hojas 880

Contenido

Prefacio xxiii

1 Introducción a la vida en la Tierra 1

ESTUDIO DE CASO La vida en la Tierra ¿Y en algún otro lugar? 1

1.1 ¿Cómo estudian la vida los científicos? 2

La vida puede estudiarse en diferentes niveles de organización 2

Los principios científicos fundamentan toda investigación científica 3

El método científico es la base de la investigación científica 4

La comunicación es esencial para la ciencia 5

La ciencia es un esfuerzo humano 5

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Experimentos controlados, antes y ahora 6

Las teorías científicas se han probado una y otra vez 8

1.2 Evolución: La teoría unificadora de la biología 9

Tres procesos naturales sustentan la evolución 9

1.3 ¿Cuáles son las características de los seres vivos? 10

Los seres vivos son complejos, están organizados y se componen de células 11

Los seres vivos mantienen condiciones internas relativamente constantes mediante la homeostasis 11

GUARDIÁN DE LA TIERRA ¿Por qué debemos preservar la biodiversidad? 12

Los seres vivos responden ante estímulos 13

Los seres vivos obtienen y usan materiales y energía 13

ENLACES CON LA VIDA La vida que nos rodea 14

Los seres vivos crecen 14

Los seres vivos se reproducen 14

En conjunto, los seres vivos poseen la capacidad de evolucionar 14

1.4 ¿Cómo clasifican los científicos en categorías la diversidad de los seres vivos? 14

Los dominios Bacteria y Archaea están constituidos por células; el dominio Eukarya se compone de células eucarióticas 14

Los dominios Bacteria y Archaea, así como los miembros del reino Protista, son principalmente unicelulares; los miembros de los reinos Fungi, Plantae y Animalia son básicamente multicelulares 15

Los miembros de los distintos reinos tienen formas diferentes de obtener energía 15

1.5 ¿Cómo ilumina la vida diaria el conocimiento de la biología? 15

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO La vida en la Tierra ¿y en algún otro lugar? 17

UNIDAD 1 La vida de una célula 19

2 Átomos, moléculas y vida 20

ESTUDIO DE CASO Caminando sobre el agua 21

2.1 ¿QUÉ SON LOS ÁTOMOS? 22

Los átomos, las unidades estructurales fundamentales de la materia, se componen de partículas aún más pequeñas 22

2.2 ¿CÓMO INTERACTÚAN LOS ÁTOMOS PARA FORMAR MOLÉCULAS? 23

Los átomos interactúan con otros átomos cuando hay vacíos en sus capas de electrones más externas 23

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA La radiactividad en la investigación 24

Los átomos con carga, llamados iones, interactúan para formar enlaces iónicos 25

Los átomos sin carga pueden estabilizarse compartiendo electrones para formar enlaces covalentes 26

Los puentes de hidrógeno son atracciones eléctricas entre las moléculas que tienen enlaces covalentes polares o dentro de éstas 28

2.3 ¿Por qué el agua es tan importante para la vida? 28

El agua interactúa con muchas otras moléculas 28

ENLACES CON LA VIDA ¿Alimentación saludable? 29

Las moléculas de agua tienden a mantenerse unidas 30

Las soluciones en agua pueden ser ácidas, básicas y neutras 31

El agua modera los efectos de los cambios de temperatura 32

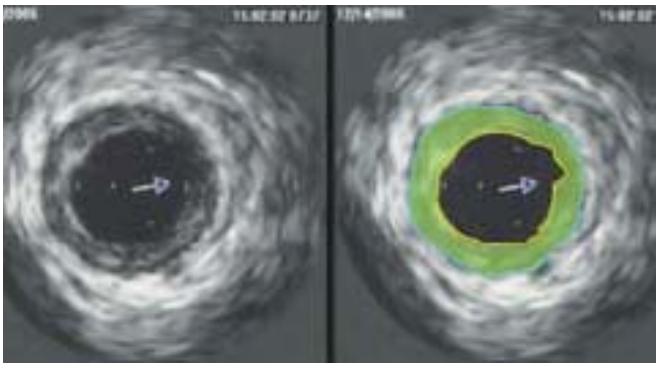
El agua forma un sólido singular: El hielo 32

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Caminando sobre el agua 33

3 Moléculas biológicas 36

ESTUDIO DE CASO Proteínas misteriosas 37

3.1 ¿Por qué el carbono es tan importante en las moléculas biológicas? 38



3.2 ¿Cómo se sintetizan las moléculas orgánicas? 38
Las moléculas biológicas se unen o se desintegran agregando o eliminando agua 39

3.3 ¿Qué son los carbohidratos? 39
Hay diversos monosacáridos con estructuras ligeramente distintas 39
ENLACES CON LA VIDA ¿Alimentos sintéticos? 41
Los disacáridos consisten en dos azúcares simples que se enlazan mediante síntesis por deshidratación 41
Los polisacáridos son cadenas de azúcares simples 42

3.4 ¿Qué son los lípidos? 44
Los aceites, las grasas y las ceras son lípidos que sólo contienen carbono, hidrógeno y oxígeno 44
Los fosfolípidos tienen "cabezas" solubles en agua y "colas" insolubles en agua 46
Los esteroides consisten en cuatro anillos de carbono fusionados 46
GUARDIÁN DE LA SALUD El colesterol, aliado y enemigo 47

3.5 ¿Qué son las proteínas? 47
Las proteínas se forman a partir de cadenas de aminoácidos 48
Los aminoácidos se unen para formar cadenas mediante síntesis por deshidratación 49
Una proteína puede tener hasta cuatro niveles de estructura 49
Las funciones de las proteínas están ligadas a sus estructuras tridimensionales 51
DE CERCA Un asunto peliagudo 52

3.6 ¿Qué son los ácidos nucleicos? 53
El DNA y el RNA (las moléculas de la herencia) son ácidos nucleicos 53
Otros nucleótidos actúan como mensajeros intracelulares y portadores de energía 53

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Proteínas misteriosas 54

4 Estructura y función de la célula 56

ESTUDIO DE CASO Repuestos para cuerpos humanos 57

4.1 ¿Qué es la teoría celular? 59

4.2 ¿Cuáles son las características básicas de las células? 59
Las funciones de las células limitan su tamaño 59
Todas las células tienen características comunes 59
Hay dos tipos básicos de células: procarióticas y eucarióticas 62

4.3 ¿Cuáles son las características principales de las células eucarióticas? 63
El citoesqueleto brinda forma, soporte y movimiento 63
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA En busca de la célula 64
Los cilios y flagelos mueven a la célula o a los líquidos para que éstos pasen por la célula 67
El núcleo es el centro de control de la célula eucariótica 67
El citoplasma eucariótico incluye un complejo sistema de membranas 70
Las vacuolas desempeñan muchas funciones, como regulación del agua, soporte y almacenamiento 72
Las mitocondrias extraen energía de las moléculas de alimento y los cloroplastos captan la energía solar 73
Las plantas utilizan plástidos para almacenamiento 74

4.4 ¿Cuáles son las características principales de las células procarióticas? 75
Las células procarióticas son pequeñas y poseen características superficiales especializadas 75
Las células procarióticas tienen menos estructuras especializadas dentro del citoplasma 76
ENLACES CON LA VIDA Huéspedes indeseables 77

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Respuestas para cuerpos humanos 77

5 Estructura y función de la membrana celular 80

ESTUDIO DE CASO Venenos nocivos 81

5.1 ¿Qué relación hay entre la estructura de una membrana celular y su función? 82
Las membranas celulares aíslan el contenido de la célula mientras permiten la comunicación con el ambiente 82
Las membranas son "mosaicos fluidos" en los que las proteínas se mueven dentro de las capas de lípidos 82
La bicapa de fosfolípidos es la porción fluida de la membrana 83
Una variedad de proteínas forman un mosaico dentro de la membrana 84

5.2 ¿Cómo logran las sustancias atravesar las membranas? 85
Las moléculas de los fluidos se mueven en respuesta a los gradientes 85
El movimiento a través de las membranas se efectúa mediante transporte pasivo y activo 86
El transporte pasivo incluye difusión simple, difusión facilitada y ósmosis 86
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El descubrimiento de las acuaporinas 89
El transporte activo utiliza energía para mover moléculas en contra de sus gradientes de concentración 91
Las células absorben partículas o fluidos mediante endocitosis 92
La exocitosis saca materiales de la célula 94
El intercambio de materiales a través de las membranas influye en el tamaño y la forma de la célula 94

5.3 ¿Cómo las uniones especializadas permiten a las células establecer conexiones y comunicarse? 95
Los desmosomas unen las células 95
Las uniones estrechas impiden las filtraciones en las células 95
Las uniones en hendidura y los plasmodesmos permiten la comunicación entre células 96

CONEXIONES EVOLUTIVAS Patas de caribú y diversidad de membranas 96

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Venenos nocivos 97

6 Flujo de energía en la vida de una célula 100

ESTUDIO DE CASO Energía liberada 101

6.1 ¿Qué es energía? 102
- Las leyes de la termodinámica describen las propiedades básicas de la energía 102
- Los seres vivos utilizan la energía de la luz solar para crear las condiciones de baja entropía de la vida 103

6.2 ¿Cómo fluye la energía en las reacciones químicas? 103
- Las reacciones exergónicas liberan energía 104
- Las reacciones endergónicas requieren un aporte neto de energía 105
- Las reacciones acopladas enlazan reacciones endergónicas y exergónicas 105

6.3 ¿Cómo se transporta energía celular entre reacciones acopladas? 105
- El ATP es el principal portador de energía en las células 105
- Los portadores de electrones también transportan energía dentro de las células 107

6.4 ¿Cómo controlan las células sus reacciones metabólicas? 108
- A temperaturas corporales, las reacciones espontáneas son demasiado lentas para sustentar la vida 108
- Los catalizadores reducen la energía de activación 108
- Las enzimas son catalizadores biológicos 108
- Las células regulan el metabolismo al controlar las enzimas 110
- Los venenos, las drogas y el ambiente influyen en la actividad de las enzimas 111
- ENLACES CON LA VIDA La falta de una enzima produce intolerancia a la lactosa 113

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Energía liberada 113

7 Captación de energía solar: Fotosíntesis 116

ESTUDIO DE CASO ¿Los dinosaurios murieron por falta de luz solar? 117

7.1 ¿Qué es la fotosíntesis? 118
- Las hojas y los cloroplastos son adaptaciones para la fotosíntesis 118
- La fotosíntesis consiste en reacciones dependientes e independientes de la luz 119

7.2 Reacciones dependientes de la luz: ¿Cómo se convierte la energía luminosa en energía química? 120
- Durante la fotosíntesis, los pigmentos de los cloroplastos captan primero la luz 120
- Las reacciones dependientes de la luz se efectúan dentro de las membranas tilacoideas 121
- DE CERCA Quimiósmosis, la síntesis de ATP en los cloroplastos 124

7.3 Reacciones independientes de la luz: ¿Cómo se almacena la energía química en las moléculas de glucosa? 125
- El ciclo C_3 capta dióxido de carbono 125
- El carbono fijado durante el ciclo C_3 se utiliza para sintetizar glucosa 126

7.5 Agua, CO_2 y la vía C_4 127
- Cuando los estomas se cierran para conservar agua se lleva a cabo la derrochadora fotorrespiración 127
- Las plantas C4 reducen la fotorrespiración mediante un proceso de fijación de carbono en dos etapas 129
- Las plantas C3 y C4 se adaptan a condiciones ambientales diferentes 129
- ENLACES CON LA VIDA Tú vives gracias a las plantas 129

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
¿Los dinosaurios murieron por falta de luz solar? 130

8 Obtención de energía: Glucólisis y respiración celular 132

ESTUDIO DE CASO Cuando los atletas aumentan el número de glóbulos rojos: ¿tienen éxito quienes engañan? 133

8.1 ¿Cómo obtienen energía las células? 134
- La fotosíntesis es la última fuente de energía celular 134
- La glucosa es una molécula clave en el almacenamiento de energía 134
- Descripción general de la descomposición de la glucosa 134

8.2 ¿Cómo se capta la energía de la glucosa durante la glucólisis? 135
- La glucólisis "descompone" la glucosa en piruvato y libera energía química 135
- En ausencia de oxígeno, la fermentación sigue a la glucólisis 135
- DE CERCA Glucólisis 136

8.3 ¿Cómo logra la respiración celular captar energía adicional de la glucosa? 138
- La respiración celular en las células eucarióticas se realiza en las mitocondrias 138
- ENLACES CON LA VIDA Un tarro de vino, una rebanada de pan y un tazón de col agria 139
- El piruvato se descompone en la matriz mitocondrial liberando más energía 139
- Los electrones de alta energía viajan a través de la cadena de transporte de electrones 140
- DE CERCA Reacciones de la matríz mitocondrial 141
- La quimiósmosis capta la energía almacenada en un gradiente de iones hidrógeno y produce ATP 141

8.4 Recapitulación 142
Un resumen de la descomposición de la glucosa en las células eucarióticas 142
La glucólisis y la respiración celular influyen en el funcionamiento de los organismos 142
GUARDIÁN DE LA SALUD ¿Por qué aumentamos de peso si ingerimos azúcar? 144
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Cuando los atletas aumentan el número de glóbulos rojos: ¿Tienen éxito quienes engañan? 145

UNIDAD 2
Herencia 147

9 DNA: La molécula de la herencia 148

ESTUDIO DE CASO Músculos, mutaciones y miostatina 149
9.1 ¿Cómo descubrieron los científicos que los genes están compuestos de DNA? 150
La transformación bacteriana pone de manifiesto el vínculo entre los genes y el DNA 150
9.2 ¿Cuál es la estructura del DNA? 151
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El DNA es la molécula de la herencia de los bacteriófagos 152
El DNA se compone de cuatro nucleótidos 154
El DNA es una doble hélice de dos cadenas de nucleótidos 154
Los puentes de hidrógeno entre bases complementarias mantienen unidas las dos cadenas de DNA 154
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El descubrimiento de la doble hélice 156
9.3 ¿Cómo codifica el DNA la información? 157
9.4 ¿Cómo logra la duplicación del DNA asegurar la constancia genética durante la división celular? 157
La duplicación del DNA es un acontecimiento fundamental en la vida de una célula 157
La duplicación del DNA produce dos moléculas de DNA idénticas, cada una con una cadena original (parental) y otra nueva (cadena hija) 157

9.5 ¿Cómo ocurren las mutaciones? 158
DE CERCA Estructura y duplicación del DNA 159
La duplicación exacta y la corrección del DNA permiten lograr una duplicación del DNA casi libre de errores 162
A veces se producen errores 163
Las mutaciones van desde cambios en pares de nucleótidos solos hasta movimientos de grandes segmentos de cromosomas 163
Las mutaciones pueden tener varios efectos en la función 163
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Músculos, mutaciones y miostatina 163

10 Expresión y regulación de los genes 166

ESTUDIO DE CASO ¡Viva la diferencia! 167
10.1 ¿Cuál es la relación entre los genes y las proteínas? 168
La mayoría de los genes contienen información para la síntesis de una sola proteína 168
El DNA da las instrucciones para la síntesis de proteínas mediante intermediarios de RNA 169
Perspectiva general: La información genética se transcribe al RNA y se traduce en proteínas 170
El código genético utiliza tres bases para especificar un aminoácido 171
10.2 ¿Cómo se transcribe la información de un gen al RNA? 172
La transcripción se inicia cuando la RNA polimerasa se une al promotor de un gen 172
El alargamiento prosigue hasta que la RNA polimerasa llega a una señal de terminación 172
10.3 ¿Cómo se traduce la secuencia de bases de una molécula de RNA mensajero a proteínas?
El RNA mensajero transporta el código para la síntesis de proteínas del DNA a los ribosomas 173
Los ribosomas consisten en dos subunidades, cada una compuesta de RNA ribosómico y proteínas 176
Las moléculas de RNA de transferencia descifran la secuencia de bases del RNAm para obtener la secuencia de aminoácidos de una proteína 176
Durante la traducción, el RNAm, el RNAt y los ribosomas cooperan para sintetizar proteínas 176
Recapitulación: Para descifrar la secuencia de bases del DNA y obtener la secuencia de aminoácidos de una proteína son necesarias la transcripción y la traducción 176
ENLACES CON LA VIDA Genética, evolución y medicina 178
10.4 ¿Cómo influyen las mutaciones del DNA en la función de los genes? 178
Las mutaciones tienen diversos efectos en la estructura y función de las proteínas 179
Inversiones y translocaciones 179
Deleciones e inserciones 179
Sustituciones 179
DE CERCA La síntesis de proteínas, un asunto de alta energía 180
Las mutaciones suministran la materia prima de la evolución 180
10.5 ¿Cómo se regulan los genes? 180
La regulación de los genes en los procariotas 181
La regulación de los genes en los eucariotas 182

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El RNA ya no es sólo un mensajero 183
Las células eucarióticas regulan la transcripción de genes individuales, regiones de cromosomas o cromosomas enteros 183
GUARDIÁN DE LA SALUD Sexo, envejecimiento y mutaciones 184
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¡Viva la diferencia! 186

11 La continuidad de la vida: Reproducción celular 190

ESTUDIO DE CASO ¿Qué tanto vale la pena un buen bronceado? 191

11.1 ¿Cuál es la función de la reproducción celular en la vida de células individuales y de organismos completos? 192
El ciclo celular procariótico consiste en crecimiento y fisión binaria 193
El ciclo celular eucariótico consiste en la interfase y la división celular 194

11.2 ¿Cómo se organiza el dna en los cromosomas de las células eucarióticas? 195
El cromosoma eucariótico consiste en una molécula de DNA lineal unida a proteínas 195
Los cromosomas eucarióticos se presentan habitualmente en pares homólogos con información genética similar 197

11.3 ¿Cómo se reproducen las células por división celular mitótica? 199
Durante la profase los cromosomas se condensan y los microtúbulos del huso se forman y se unen a los cromosomas 200
Durante la metafase los cromosomas se alinean a lo largo del ecuador de la célula 200
Durante la anafase las cromátidas hermanas se separan y son atraídas hacia polos opuestos de la célula 200
Durante la telofase la envoltura nuclear se forma alrededor de ambos grupos de cromosomas 200
Durante la citocinesis el citoplasma se divide entre dos células hijas 200
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Copias al carbón, la clonación en la naturaleza y en el laboratorio 202
Los puntos de control regulan el progreso durante el ciclo celular 204
La actividad de enzimas específicas impulsa el ciclo celular 204
Mecanismos de regulación sobre los puntos de control 205

11.5 ¿Por qué tantos organismos se producen sexualmente? 206
Las mutaciones de DNA son la fuente última de la variabilidad genética 206
La reproducción sexual puede combinar diferentes alelos progenitores en un solo descendiente 207

11.6 ¿Cómo la división celular meiótica produce células haploides? 207
La meiosis separa los cromosomas homólogos y produce núcleos hijos haploides 207
GUARDIÁN DE LA SALUD Cáncer, división celular mitótica descontrolada 208
La división celular meiótica seguida por la fusión de gametos mantiene constante el número de cromosomas de una generación a otra 209
La meiosis I separa los cromosomas homólogos en dos núcleos haploides hijos 209
La meiosis II separa las cromátidas hermanas en cuatro núcleos hijos 213

11.7 ¿Cuándo ocurren la división celular meiótica y mitótica en el ciclo de la vida de los eucariotas? 213
En los ciclos de vida haploides, la mayoría del ciclo consta de células haploides 214
En los ciclos de vida diploides la mayoría del ciclo consiste en células diploides 215
En la alternancia del ciclo de vida de las generaciones, hay tanto etapas multicelulares haploides como diploides 215

11.8 ¿De qué forma la meiosis y la reproducción sexual originan variabilidad genética? 216
La redistribución de homólogos crea combinaciones nuevas de cromosomas 216
El entrecruzamiento crea cromosomas con combinaciones nuevas de genes 217
La fusión de gametos aporta más variabilidad genética a la descendencia 217
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Qué tanto vale la pena un buen bronceado? 217

12 Patrones de herencia 220

ESTUDIO DE CASO Muerte súbita en la cancha 221

12.1 ¿Cuál es la base física de la herencia? 222
Los genes son secuencias de nucleótidos en lugares específicos dentro de los cromosomas 222
Los dos alelos de un organismo pueden ser iguales o diferentes 222

12.2 ¿Cómo estableció Gregor Mendel los cimientos de la genética moderna? 222
Hacer bien las cosas: Los secretos del éxito de Mendel 222

12.3 ¿Cómo se heredan los rasgos individuales? 223

La hipótesis de Mendel sirve para predecir el resultado de nuevos tipos de cruzas de rasgos individuales 226

12.4 ¿Cómo se heredan los rasgos múltiples? 227
Mendel planteó la hipótesis de que los rasgos se heredan de forma independiente 227
En un mundo no preparado, el genio podría pasar inadvertido 228

12.5 ¿Cómo se heredan los genes localizados en un mismo cromosoma? 229
Los genes que están en un mismo cromosoma tienden a heredarse juntos 229
La recombinación crea nuevas combinaciones de alelos ligados 230

12.6 ¿Cómo se determina el sexo y cómo se heredan los genes ligados a los cromosomas sexuales? 231
Los genes ligados a los cromosomas sexuales se encuentran sólo en el cromosoma *X* o sólo en el cromosoma *Y* 231

12.7 ¿Las leyes mendelianas de la herencia se aplican a todos los rasgos? 233
Dominancia incompleta: el fenotipo de los heterocigotos es un intermedio entre los fenotipos de los homocigotos 233
Un solo gen puede tener múltiples alelos 233
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Fibrosis quística 234
Muchos rasgos reciben influencia de varios genes 235
Los genes individuales comúnmente tienen múltiples efectos en el fenotipo 235
El ambiente influye en la expresión de los genes 237

12.8 ¿Cómo se investigan las anomalías genéticas humanas? 237

12.9 ¿Cómo se heredan las anomalías humanas originadas por genes individuales? 238
Algunas anomalías genéticas humanas se deben a alelos recesivos 238
Algunas anomalías genéticas humanas se deben a alelos dominantes 239
Algunas anomalías humanas están ligadas a los cromosomas sexuales 240

12.10 ¿Cómo afectan a los seres humanos los errores en el número de cromosomas? 240
Ciertas anomalías genéticas humanas se deben a un número anormal de cromosomas sexuales 241
Ciertas anomalías genéticas humanas se deben a un número anormal de autosomas 243

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Muerte súbita en la cancha 244

13 Biotecnología 250

ESTUDIO DE CASO ¿Culpable o inocente? 251

13.1 ¿Qué es la biotecnología? 252

13.2 ¿Cómo se recombina el DNA en la naturaleza? 252

13.3 ¿Cómo se emplea la biotecnología en la ciencia forense? 254
La reacción en cadena de la polimerasa amplifica una secuencia específica de DNA 254
La elección de los iniciadores determina cuáles secuencias de DNA se amplifican 255
La electroforesis en gel separa los segmentos del DNA 256
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Aguas termales y la ciencia del calor 256
Las sondas de DNA se emplean para etiquetar secuencias de nucleótidos específicas 257
Cada individuo tiene su propio perfil de DNA 258

13.4 ¿Cómo se utiliza la biotecnología en la agricultura? 258
Muchos cultivos se modifican genéticamente 258
Las plantas genéticamente modificadas sirven para elaborar medicamentos 260
Los animales genéticamente modificados pueden ser de utilidad en agricultura y en medicina 261

13.5 ¿Cómo se emplea la biotecnología para aprender sobre el genoma humano? 261

13.6 ¿Cómo se utiliza la biotecnología en el diagnóstico médico y en el tratamiento de las enfermedades? 262
La tecnología del DNA puede emplearse para diagnosticar trastornos hereditarios 262
La tecnología del DNA ayuda a tratar las enfermedades 264

13.7 ¿Cuáles son las principales implicaciones éticas de la biotecnología moderna? 265
ENLACES CON LA VIDA Biotecnología, de lo sublime a lo ridículo 266
¿Deberían permitirse en la agricultura los organismos genéticamente modificados? 266
GUARDIÁN DE LA BIOTECNOLOGÍA Arroz dorado 267
GUARDIÁN DE LA SALUD Diagnóstico genético prenatal 268
¿Debería cambiarse el genoma humano con la biotecnología? 270

UNIDAD 3 Evolución y diversidad de la vida 275

14 Principios de la evolución 276

ESTUDIO DE CASO ¿Qué tan útiles son las muelas del juicio? 277

14.1 ¿Cómo se desarrollaron las ideas sobre la evolución? 278
- Los primeros estudios de biología no incluían el concepto de evolución 278
- La exploración de nuevos territorios reveló una sorprendente diversidad de la vida 279
- Algunos científicos especularon que la vida había evolucionado 279
- Los descubrimientos de fósiles demostraron que la vida había cambiado a lo largo del tiempo 279
- Algunos científicos idearon explicaciones no evolutivas a partir de los fósiles 280
- La geología ofreció la evidencia de que la Tierra es sumamente antigua 280
- Algunos biólogos anteriores a Darwin propusieron mecanismos de evolución 281
- Darwin y Wallace describieron un mecanismo de evolución 281
- INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Charles Darwin: La naturaleza era su laboratorio 282

14.2 ¿Cómo sabemos que ha habido evolución? 282
- Los fósiles ofrecen evidencias del cambio evolutivo al paso del tiempo 283
- La anatomía comparada ofrece evidencia de que la descendencia ha sufrido modificaciones 283
- Las etapas embrionarias de los animales sugieren la existencia de antepasados comunes 286
- Los análisis bioquímicos y genéticos modernos ponen de manifiesto el parentesco entre diversos organismos 286

14.3 ¿Cómo funciona la selección natural? 288
- La teoría de Darwin y Wallace se basa en cuatro postulados 288
- Postulado 1: Las poblaciones varían 288
- Postulado 2: Los rasgos se heredan 289
- Postulado 3: Algunos individuos no logran sobrevivir y reproducirse 289
- Postulado 4: El éxito reproductivo no es aleatorio 289
- La selección natural modifica las poblaciones al paso del tiempo 289

14.4 ¿Qué pruebas se tienen de que las poblaciones evolucionan por selección natural? 289
- La reproducción controlada modifica los organismos 289
- La evolución por selección natural ocurre en la actualidad 290

14.5 Epílogo de Charles Darwin 292

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Qué tan útiles son las muelas del juicio 292

15 Cómo evolucionan los organismos 294

ESTUDIO DE CASO Evolución de una amenaza 295

15.1 ¿Cómo se relacionan las poblaciones, los genes y la evolución? 296
- La evolución es el cambio de la frecuencia de alelos dentro de una población 297
- La población en equilibrio es una población hipotética donde no ocurre la evolución 297
- DE CERCA El principio de Hardy-Weinberg 298

15.2 ¿Qué causa la evolución? 298
- Las mutaciones son la fuente original de la variabilidad genética 298
- El flujo de genes entre poblaciones cambia las frecuencias de alelos 300
- Las frecuencias de alelos pueden cambiar en poblaciones pequeñas 300
- El apareamiento dentro de una población casi nunca es fortuito 304
- No todos los genotipos son igualmente benéficos 304

15.3 ¿Cómo funciona la selección natural? 306
- La selección natural es en realidad una reproducción diferencial 306
- La selección natural actúa sobre los fenotipos 306
- Algunos fenotipos se reproducen con mayor éxito que otros 306
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Especies en peligro de extinción: De la poza génica a los "charcos de genes" 308
- La selección influye en las poblaciones de tres formas 309

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Evolución de una amenaza 311

16 El origen de las especies 314

ESTUDIO DE CASO Un mundo perdido 315

16.1 ¿QUÉ ES UNA ESPECIE? 316
- Los biólogos necesitan una clara definición de especie 316
- Las especies son grupos de poblaciones que se cruzan entre sí 316
- La apariencia resulta engañosa 316

16.2 ¿Cómo se conserva el aislamiento reproductivo entre las especies? 317
- Los mecanismos de aislamiento anteriores al apareamiento impiden que especies diferentes se apareen 317
- Los mecanismos de aislamiento posteriores al apareamiento limitan la descendencia híbrida 319

16.3 ¿Cómo se forman nuevas especies? 320
- La separación geográfica de una población conduce a la especiación alopátrica 321
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Hibridación y extinción 322
- El aislamiento ecológico de una población conduce a la especiación simpátrica 322
- En ciertas condiciones, pueden surgir muchas nuevas especies 324

16.4 ¿A qué se debe la extinción? 324
La distribución localizada y la especialización excesiva aumentan la vulnerabilidad de las especies ante los cambios ambientales 324
Las interacciones con otros organismos pueden llevar a una especie a su extinción 325
DE CERCA Especiación por mutación 326
El cambio y la destrucción del hábitat son las causas principales de la extinción 326
CONEXIONES EVOLUTIVAS Los científicos no ponen en duda la evolución 326
ENLACES CON LA VIDA Los nombres científicos y la vanidad 328
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Un mundo perdido 328

17 Historia de la vida 330

ESTUDIO DE CASO Gente pequeña, historia grande 331
17.1 ¿Cómo empezó la vida? 332
Los experimentos refutaron la generación espontánea 332
Los primeros organismos vivos surgieron de los no vivos 332
El RNA pudo haber sido la primera molécula en autorreplicarse 334
Las microesferas membranosas pudieron haber encerrado las ribozimas 334
Pero, ¿realmente sucedió todo esto? 334
17.2 ¿Cómo eran los primeros organismos? 335
Los primeros organismos fueron procariotas anaerobios 335
Algunos organismos adquirieron la capacidad de captar la energía solar 337
La fotosíntesis aumentó la cantidad de oxígeno en la atmósfera 337
El metabolismo aeróbico surgió como respuesta a la crisis del oxígeno 337
Algunos organismos adquirieron organelos encerrados en membranas 337
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil? 338
17.3 ¿Cómo eran los primeros organismos multicelulares? 339
Algunas algas se volvieron multicelulares 340
La diversidad animal surgió en la era precámbrica 340
17.4 ¿Cómo llegó la vida a la tierra firme? 340
17.5 ¿Cuál ha sido el papel de la extinción en la historia de la vida? 344
La historia de la evolución ha estado marcada por extinciones periódicas en masa 345
El cambio climático contribuyó con las extinciones en masa 345
Los sucesos catastróficos pudieron haber causado las peores extinciones en masa 346
17.6 ¿Cómo evolucionaron los seres humanos? 346
Los seres humanos heredaron algunas adaptaciones de antiguos primates para vivir en los árboles 346
Los fósiles del homínido más antiguo provienen de África 347
Los homínidos más antiguos podían mantenerse en pie y caminar erguidos 347
Varias especies de *Australopithecus* surgieron en África 349
El género *Homo* se derivó del australopitecino hace 2.5 millones de años 349
La evolución del *Homo* estuvo acompañada por adelantos en la tecnología de las herramientas 349
Los hombres de Neanderthal tenían cerebros grandes y excelentes herramientas 350
Los seres humanos modernos surgieron hace menos de 200,000 años 350
Varias oleadas de homínidos emigraron de África 351
El origen evolutivo de los cerebros grandes quizás esté relacionado con el consumo de carne 351
El origen evolutivo de la conducta humana es altamente especulativo 353
La evolución cultural de los seres humanos es ahora mucho más rápida que la evolución biológica 353
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Gente pequeña, historia grande 353

18 Sistemática: Búsqueda de orden en medio de la diversidad 356

ESTUDIO DE CASO El origen de un asesino 357
18.1 ¿Cómo se nombran y clasifican los organismos? 358
Cada especie tiene un nombre único constituido por dos elementos 358
La clasificación se originó como una jerarquía de categorías 358
Los sistemáticos identifican las características que revelan las relaciones evolutivas 358
La anatomía desempeña un papel clave en la sistemática 359
Las semejanzas moleculares también son útiles para reconstruir la filogenia 360
18.2 ¿Cuáles son los dominios de la vida? 360
El sistema de cinco reinos mejoró los esquemas de clasificación 360
El sistema de tres dominios refleja con más precisión la historia de la vida 360
La clasificación en términos de reinos aún no está totalmente establecida 361
DE CERCA Reconstrucción de los árboles filogenéticos 362
18.3 ¿Por qué cambian las clasificaciones? 364
La designación de las especies cambia cuando se descubre nueva información 364
La definición de especie biológica en ocasiones es difícil o imposible de aplicar 364
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

18.4 ¿Cuántas especies existen? 366
ENLACES CON LA VIDA Un mundo pequeño 367
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DEL CASO:
El origen de un asesino 367

19 La diversidad de los procariotas y los virus 370

ESTUDIO DE CASO: Agentes de muerte 371

19.1 ¿Cuáles son los organismos que constituyen los dominios procarióticos Bacteria y Archaea? 372
Las bacterias y las arqueas son fundamentalmente diferentes 372
Los procariotas dentro de cada dominio son difíciles de clasificar 372
Los procariotas difieren en tamaño y forma 373

19.2 ¿Cómo sobreviven y se reproducen los procariotas? 373
Algunos procariotas son móviles 373
Muchas bacterias forman películas en las superficies 373
Las endosporas protectoras permiten a algunas bacterias soportar condiciones adversas 374
Los procariotas se especializan en hábitat específicos 374
Los procariotas presentan diversos tipos de metabolismo 375
Los procariotas se reproducen por fisión binaria 375
Los procariotas pueden intercambiar material genético sin reproducirse 376

19.3 ¿Cómo afectan los procariotas a los humanos y a otros eucariotas? 376
Los procariotas desempeñan papeles importantes en la nutrición animal 376
Los procariotas captan el nitrógeno que necesitan las plantas 376
Los procariotas son los recicladores de la naturaleza 376
Los procariotas pueden reducir la contaminación 377
Algunas bacterias constituyen una amenaza para la salud de los seres humanos 377
ENLACES CON LA VIDA Comensales indeseables 378

19.4 ¿Qué son los virus, los viroides y los priones? 379
Un virus consiste en una molécula de DNA o RNA envuelta en una cubierta proteica 380
Los virus son parásitos 380
Algunos agentes infecciosos son aún más simples que los virus 381
DE CERCA ¿Cómo se replican los virus? 382
Nadie sabe con certeza cómo se originaron estas partículas infecciosas 383
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Agentes de muerte 384

20 La diversidad de los protistas 386

ESTUDIO DE CASO: El monstruo verde 387

20.1 ¿Qué son los protistas? 388
La mayoría de los protistas son unicelulares 389
Los protistas presentan diversas formas de nutrición 389
Los protistas emplean diversas formas de reproducción 389
Los protistas provocan efectos importantes en los humanos 390

20.2 ¿Cuáles son los principales grupos de protistas? 390
Los excavados carecen de mitocondrias 390
Los euglenozoos tienen mitocondrias características 391
Los stramenopiles incluyen organismos fotosintéticos y no fotosintéticos 392
Los alveolados incluyen parásitos, depredadores y fitoplancton 393
Los cercozoos tienen seudópodos delgados y conchas complejas 395
Los amebozoos habitan en ambientes acuáticos y terrestres 397
Las algas rojas habitan principalmente en los océanos tropicales de aguas transparentes 398
La mayoría de las algas verdes habitan en estanques y lagos 399
CONEXIONES EVOLUTIVAS
Nuestros ancestros unicelulares 400
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO: El monstruo verde 400

21 La diversidad de las plantas 402

ESTUDIO DE CASO La reina de los parásitos 403

21.1 ¿Cuáles son las principales características de las plantas? 404
En las plantas se alternan las generaciones multicelulares haploides y diploides 404
Las plantas tienen embriones multicelulares y dependientes 404
Las plantas desempeñan un papel ecológico fundamental 404
Las plantas satisfacen las necesidades de los humanos y halagan sus sentidos 405

21.2 ¿Cuál es el origen evolutivo de las plantas? 405
Las algas verdes dieron origen a las plantas terrestres 405
Los ancestros de las plantas vivieron en aguas dulces 405

21.3 ¿Cómo se adaptaron las plantas a la vida en la tierra? 406
El cuerpo de las plantas resiste la gravedad y la sequía 406
Los embriones de las plantas están protegidos y sus células sexuales se dispersan en ausencia de agua 406

21.4 ¿Cuáles son los principales grupos de plantas? 407
Las briofitas carecen de estructuras de conducción 407
Las plantas vasculares tienen vasos conductores que también brindan sostén 410
Las plantas vasculares sin semilla incluyen los licopodios, las colas de caballo y los helechos 410
Las plantas con semilla dominan la Tierra con la ayuda de dos adaptaciones importantes: el polen y las semillas 410
Las gimnospermas son plantas con semilla que carecen de flores 410
Las angiospermas son plantas con semilla que dan flores 416
Las plantas que evolucionaron más recientemente tienen gametofitos más pequeños 416
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

22 La diversidad de los hongos 422

ESTUDIO DE CASO: Hongos descomunales 423

22.1 ¿Cuáles son las principales características de los hongos? 424
- El cuerpo de los hongos se compone de filamentos 424
- Los hongos obtienen sus nutrimentos de otros organismos 424
- Los hongos se propagan a través de esporas 424
- La mayoría de los hongos se pueden reproducir tanto sexual como asexualmente 425

22.2 ¿Cuáles son los principales tipos de hongos? 425
- Los quitridiomicetos producen esporas natatorias 425
- Los cigomicetos se reproducen formando esporas diploides 426
- Los ascomicetos forman esporas en una funda semejante a un saco 429
- Los basidiomicetos producen estructuras reproductoras con forma de clava 429

22.3 ¿De qué manera interactúan los hongos con otras especies? 430
- Los líquenes se componen de hongos que viven con algas o bacterias fotosintéticas 430
- Las micorrizas son hongos asociados con las raíces de plantas 432
- Los endófitos son hongos que viven dentro de los tallos y las hojas de las plantas 432
- Algunos hongos son recicladores importantes 432

22.4 ¿Cómo afectan los hongos a los seres humanos? 433
- Los hongos atacan plantas que son importantes para las personas 433
- Los hongos producen enfermedades humanas 434
- Los hongos pueden producir toxinas 434
- Muchos antibióticos se derivan de los hongos 434
- GUARDIÁN DE LA TIERRA El caso de las setas que desaparecen 435
- Los hongos hacen importantes aportaciones a la gastronomía 435
- CONEXIONES EVOLUTIVAS El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos 435
- ENLACES CON LA VIDA Recolecta con cuidado 436

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Hongos descomunales 437

23 Diversidad animal I: Invertebrados 440

ESTUDIO DE CASO Búsqueda de un monstruo marino 441

23.1 ¿Cuáles son las principales características de los animales? 442

23.2 ¿Qué características anatómicas marcan los puntos de bifurcación en el árbol evolutivo de los animales? 442

23.3 ¿Cuáles son los principales fila de animales? 445
- Las esponjas tienen un cuerpo simple 445
- Los cnidarios son depredadores bien armados 447
- Los gusanos planos tienen órganos pero carecen de sistemas respiratorio y circulatorio 450
- Los anélidos están formados por segmentos idénticos 451
- La mayoría de los moluscos tienen conchas 453
- ENLACES CON LA VIDA Ayudantes de cirujanos 454
- Los artrópodos son los animales que dominan la Tierra 456
- Los gusanos redondos abundan y en su mayoría son diminutos 462
- Los equinodermos tienen un esqueleto de carbonato de calcio 463
- Los cordados incluyen a los vertebrados 464

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Búsqueda de un monstruo marino 464

24 Diversidad animal II: Vertebrados 468

ESTUDIO DE CASO: Historia de peces 468

24.1 ¿Cuáles son las características distintivas de los cordados? 470
- Todos los cordados comparten cuatro estructuras distintivas 470
- Los cordados invertebrados habitan en los mares 471
- Los vertebrados tienen espina dorsal 471

24.2 ¿Cuáles son los principales grupos de vertebrados? 472
- Algunos vertebrados carecen de mandíbulas 472
- Los peces con mandíbulas dominan las aguas de la Tierra 473
- Los anfibios tienen una doble vida 475
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Ranas en peligro 476
- Los reptiles y las aves se han adaptado a la vida terrestre 477
- Los mamíferos producen leche para sus crías 480
- CONEXIONES EVOLUTIVAS ¿Los seres humanos son un éxito biológico? 482
- ENLACES CON LA VIDA ¿Los animales pertenecen a los laboratorios? 483

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Historia de peces 484

UNIDAD 4 Comportamiento y ecología 487

25 Comportamiento animal 488

ESTUDIO DE CASO Sexo y simetría 489

25.1 ¿En qué difieren los comportamientos innatos y los aprendidos? 490
- Los comportamientos innatos no requieren experiencia previa 490
- Los comportamientos aprendidos se modifican con la experiencia 490

No hay una distinción importante entre comportamientos innatos y aprendidos 492

25.2 ¿Cómo se comunican los animales? 495
La comunicación visual es la más eficaz a distancias cortas 495
La comunicación por sonido es eficaz a distancias más largas 496
Los mensajes químicos persisten más tiempo y es difícil variarlos 496
La comunicación por tacto ayuda a establecer vínculos sociales 497

25.3 ¿Cómo compiten los animales por recursos? 497
Un comportamiento agresivo ayuda a obtener y conservar recursos 497
Las jerarquías de dominancia ayudan a controlar las interacciones agresivas 498
Los animales podrían defender territorios que contienen recursos 499

25.4 ¿Cómo encuentran pareja los animales? 501
Las señales vocales y visuales codifican el sexo, la especie y la calidad individual 501

25.5 ¿Qué tipos de sociedades forman los animales? 502
La vida en grupo tiene ventajas y desventajas 502
El comportamiento social varía entre especies 502
La formación de grupos con parientes fomenta el desarrollo del altruismo 503
Las abejas viven juntas en sociedades de estructura rígida 504
Las ratas topo desnudas forman una sociedad compleja de vertebrados 505

25.6 ¿La biología logra explicar el comportamiento humano? 506
El comportamiento de los recién nacidos tiene un componente innato importante 506
Los humanos adquieren el lenguaje fácilmente desde pequeños 506
Los comportamientos comunes a culturas diversas podrían ser innatos 507
Las personas podrían responder a feromonas 507
Estudios con gemelos revelan los componentes genéticos del comportamiento 508
La investigación biológica del comportamiento humano genera controversia 508
CONEXIONES EVOLUTIVAS ¿Por qué juegan los animales? 508

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Sexo y simetría 509

26 Crecimiento y regulación de las poblaciones 512

ESTUDIO DE CASO El misterio de la Isla de Pascua 513

26.1 ¿Cómo cambian de tamaño las poblaciones? 514
El potencial biótico puede generar un crecimiento exponencial 514

26.2 ¿Cómo se regula el crecimiento de las poblaciones? 515
El crecimiento exponencial ocurre sólo en condiciones especiales 515
La resistencia ambiental limita el crecimiento de las poblaciones 518
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Ciclos en las poblaciones de presas y depredadores 519

26.3 ¿Cómo se distribuyen las poblaciones en el espacio y en el tiempo? 524

26.4 ¿Cómo está cambiando la población humana? 526
Los demógrafos estudian los cambios en la población humana 526
La población humana continúa creciendo rápidamente 526
Los adelantos tecnológicos han incrementado la capacidad de carga de seres humanos en la Tierra 526
GUARDIÁN DE LA TIERRA ¿Hemos excedido la capacidad de carga de la Tierra? 528
El crecimiento demográfico se distribuye de manera desigual 528
La estructura de edades actual de una población predice su crecimiento futuro 529
En Europa la fertilidad está por debajo del nivel de reposición 530
La población de Estados Unidos crece rápidamente 532
ENLACES CON LA VIDA Pisar ligeramente: ¿Qué tan grande es tu "huella"? 533

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El misterio de la Isla de Pascua 532

27 Interacciones de la comunidad 536

ESTUDIO DE CASO Invasión del mejillón cebra 537

27.1 ¿Por qué son importantes las interacciones de la comunidad? 538

27.2 ¿Cuál es la relación entre el nicho ecológico y la competencia? 538
El nicho ecológico define el lugar y el papel de cada especie en su ecosistema 538
La competencia ocurre siempre que dos organismos intentan utilizar los mismos recursos limitados 538
Las adaptaciones reducen la superposición de nichos ecológicos entre especies que coexisten 539
La competencia interespecífica contribuye a regular el tamaño de la población y la distribución de cada especie 540
La competencia dentro de una especie es un factor primordial en el control del tamaño de la población 540

27.3 ¿Cuáles son los resultados de las interacciones entre los depredadores y sus presas? 540
GUARDIÁN DE LA TIERRA Especies invasoras trastornan las interacciones de la comunidad 541
Las interacciones entre depredador y presa moldean las adaptaciones evolutivas 543

27.4 ¿Qué es la simbiosis? 547

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Hormigas y acacias: una asociación ventajosa 549

27.5 ¿Cómo influyen las especies clave en la estructura de la comunidad? 549

27.6 Sucesión: ¿Cómo cambia una comunidad a través del tiempo? 550

Existen dos formas principales de sucesión: Primaria y secundaria 550

También hay sucesión en los estanques y lagos 553

La sucesión culmina en la comunidad clímax 553

Algunos ecosistemas se mantienen en un estado de subclímax 553

CONEXIONES EVOLUTIVAS: ¿El camuflaje es capaz de dividir una especie? 554

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO La invasión del mejillón cebra 555

28 ¿Cómo funcionan los ecosistemas? 558

ESTUDIO DE CASO El regreso del salmón 559

28.1 ¿Cuáles son las trayectorias de la energía y de los nutrimentos? 560

28.2 ¿Cómo fluye la energía a través de las comunidades? 561

La energía entra en las comunidades por la vía de la fotosíntesis 561

La energía pasa de un nivel trófico a otro 562

La transferencia de energía de un nivel trófico a otro es ineficiente 564

GUARDIÁN DE LA TIERRA Las sustancias tóxicas se acumulan a lo largo de las cadenas alimentarias 566

28.3 ¿Cómo se desplazan los nutrimentos dentro de los ecosistemas y entre ellos? 567

El ciclo del carbono pasa por la atmósfera, los océanos y las comunidades 567

La reserva principal de nitrógeno es la atmósfera 568

El ciclo del fósforo carece de componentes atmosféricos 569

La mayor parte del agua no sufre cambios químicos durante su ciclo 570

28.4 ¿A qué se debe la lluvia ácida? 571

La sobrecarga de los ciclos del nitrógeno y del azufre es la causa de la lluvia ácida 571

La sedimentación ácida daña la vida en lagos y bosques 572

La Ley del Aire Limpio ha reducido significativamente las emisiones de azufre, pero no las de nitrógeno 572

28.5 ¿Qué provoca el calentamiento global? 572

La interferencia en el ciclo del carbono contribuye al calentamiento global 572

Los gases de invernadero retienen el calor en la atmósfera 573

El calentamiento global tendrá graves consecuencias 574

¿Cómo está respondiendo la humanidad a esta amenaza? 575

GUARDIANES DE LA TIERRA Los polos en peligro 576

ENLACES CON LA VIDA Es posible hacer una diferencia 577

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El regreso del salmón 577

29 Los diversos ecosistemas de la Tierra 580

ESTUDIO DE CASO Alas de esperanza 581

29.1 ¿Qué factores influyen en el clima de la Tierra? 582

El Sol es el motor del clima y del estado del tiempo 582

Muchos factores físicos también influyen en el clima 582

29.2 ¿Qué condiciones son necesarias para la vida? 585

GUARDIÁN DE LA TIERRA El agujero de ozono, una abertura en nuestro escudo protector 586

29.3 ¿Cómo se distribuye la vida en el medio terrestre? 585

Los biomas terrestres sostienen comunidades vegetales características 587

ENLACES CON LA VIDA ¿Disfrutar del chocolate y salvar selvas tropicales? 591

La precipitación pluvial y la temperatura determinan la vegetación que un bioma es capaz de sostener 598

29.4 ¿Cómo se distribuye la vida en el medio acuático? 598

Los ecosistemas de agua dulce incluyen lagos, corrientes y ríos 598

Los ecosistemas marinos cubren gran parte de la Tierra 601

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Alas de esperanza 607

30 Conservación de la biodiversidad de la tierra 610

ESTUDIO DE CASO De regreso de la extinción 611

30.1 ¿Qué es la biodiversidad y por qué debemos cuidarla? 612

Servicios de los ecosistemas: Usos prácticos para la biodiversidad 612

La economía ecológica reconoce el valor monetario de los servicios de los ecosistemas 614

30.2 ¿Está disminuyendo la biodiversidad de la Tierra? 615

La extinción es un proceso natural, pero las tasas se han elevado de forma alarmante 615

GUARDIÁN DE LA TIERRA Restauración de los Everglades 616

Cada vez es mayor el número de especies amenazadas por la extinción 616

30.3 ¿Cuáles son las principales amenazas contra la biodiversidad? 617

La humanidad está acabando con el "capital ecológico" de la Tierra 617

GUARDIÁN DE LA TIERRA

GUARDIÁN DE LA TIERRA En defensa de las tortugas marinas 621

30.4 ¿Cómo puede ayudar la biología de la conservación a preservar la biodiversidad? 623

Fundamentos de la biología de la conservación 623

La biología de la conservación es una ciencia integrada 623

Preservación de los ecosistemas salvajes 623

GUARDIÁN DE LA TIERRA Recuperación de un depredador clave 624

30.5 ¿Por qué la sustentabilidad es la clave de la conservación? 625

La vida y el desarrollo sustentables estimulan el bienestar ecológico y de la humanidad a largo plazo 625

Las reservas de la biosfera ofrecen modelos para la conservación y el desarrollo sustentable 626

La agricultura sustentable ayuda a preservar las comunidades naturales 627

El futuro está en tus manos 627

GUARDIÁN DE LA TIERRA Preservación de la biodiversidad con café cultivado a la sombra 629

ENLACES CON LA VIDA ¿Qué pueden hacer los individuos? 630

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO De regreso a la extinción 629

UNIDAD 5

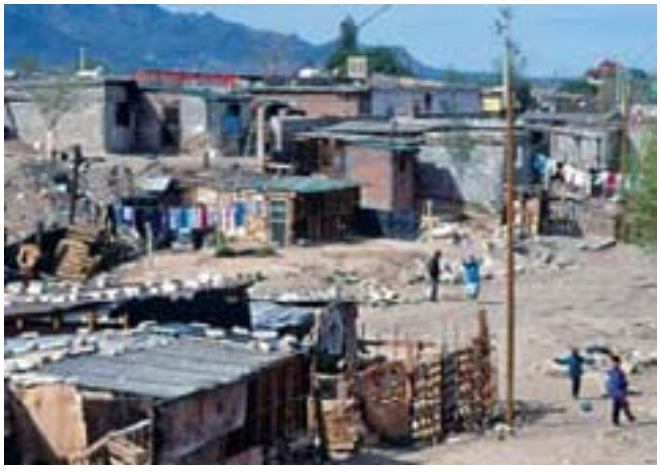
Anatomía y fisiología de los animales 633

31 Homeostasis y organización del cuerpo animal 634

ESTUDIO DE CASO ¿La vida suspendida? 635

31.1 Homeostasis: ¿Cómo regulan los animales su ambiente interno? 636

El ambiente interno se mantiene en un estado de continuidad dinámica 636



Los animales se clasifican por la forma en que regulan su temperatura corporal 636

ENLACES CON LA VIDA ¿Calor o humedad? 637

Los sistemas de retroalimentación regulan las condiciones internas 638

Los sistemas internos del cuerpo actúan de manera coordinada 639

31.2 ¿Cómo está organizado el cuerpo animal? 639

Los tejidos animales se componen de células similares que desempeñan una función específica 639

Los órganos incluyen dos o más tipos de tejidos que interactúan 643

Los sistemas de órganos consisten en dos o más órganos que interactúan 644

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿La vida suspendida? 646

32 Circulación 648

ESTUDIO DE CASO Muerte súbita 649

32.1 ¿Qué características y funciones principales tienen los sistemas circulatorios? 650

Los animales tienen dos tipos de sistemas circulatorios 650

El sistema circulatorio de los vertebrados tiene muy diversas funciones 651

32.2 ¿Cómo funciona el corazón de los vertebrados? 651

Durante la evolución de los vertebrados han surgido corazones cada vez más complejos y eficientes 651

El corazón de los vertebrados consta de dos cavidades musculares que forman dos bombas individuales 652

GUARDIÁN DE LA SALUD Al rescate de los corazones enfermos 654

32.3 ¿Qué es la sangre? 657

El plasma es primordialmente agua en la que se disuelven proteínas, sales, nutrimentos y desechos 658

Los glóbulos rojos llevan oxígeno de los pulmones a los tejidos 658

Los glóbulos blancos ayudan a defender al cuerpo contra las enfermedades 659

Las plaquetas son fragmentos celulares que ayudan a coagular la sangre 659

32.4 ¿Qué tipo de vasos sanguíneos hay y qué funciones tienen? 661

Las arterias y arteriolas son vasos de paredes gruesas que transportan sangre desde el corazón 661

Los capilares son vasos microscópicos que permiten el intercambio de nutrimentos y desechos entre la sangre y las células del cuerpo 661

Las venas y vénulas llevan sangre de regreso al corazón 662

Las arteriolas controlan la distribución del flujo sanguíneo 662

32.5 ¿Cómo colabora el sistema linfático con el circulatorio? 663

Los vasos linfáticos se parecen a las venas y capilares del sistema circulatorio 664

El sistema linfático devuelve líquidos a la sangre 664

El sistema linfático transporta grasas del intestino delgado a la sangre 665

El sistema linfático ayuda a defender al cuerpo contra las enfermedades 665

33 Respiración 668

ESTUDIO DE CASO Vidas que se esfuman 669

33.1 ¿Por qué es necesario El intercambio de gases? 670

33.2 ¿Cuáles son algunas de las adaptaciones evolutivas que permiten el intercambio de gases? 670

Algunos animales de ambientes húmedos carecen de estructuras respiratorias especializadas 671

Los sistemas respiratorios facilitan el intercambio de gases por difusión 671

Las branquias facilitan el intercambio de gases en ambientes acuáticos 672

Los animales terrestres tienen estructuras respiratorias internas 672

DE CERCA Las branquias y los gases: un intercambio contracorriente 674

33.3 ¿Cómo funciona el aparato respiratorio humano? 675

La porción conductora del aparato respiratorio lleva aire a los pulmones 675

El intercambio de gases se efectúa en los alveolos 676

El oxígeno y el dióxido de carbono son transportados por mecanismos distintos 677

GUARDIÁN DE LA SALUD Fumar: una decisión de vida 678

ENLACES CON LA VIDA Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores 680

El aire se inhala activamente y se exhala pasivamente 680

El centro respiratorio del cerebro controla la frecuencia respiratoria 680

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Vidas que se esfuman 681

34 Nutrición y digestion 684

ESTUDIO DE CASO ¿Adelgazar hasta morir? 685

34.1 ¿Qué nutrimentos necesitan los animales? 686

La energía se obtiene de los nutrimentos y se mide en calorías 686

Los lípidos incluyen triglicéridos (grasas), fosfolípidos y colesterol 686

GUARDIÁN DE LA SALUD Cuando se antoja una hamburguesa con queso 687

Los carbohidratos son una fuente de energía rápida 688

Los aminoácidos forman los bloques de construcción de las proteínas 688

Los minerales son elementos indispensables para el cuerpo 688

Las vitaminas desempeñan diversos papeles en el metabolismo 688

Dos terceras partes del cuerpo humano se componen de agua 691

Ciertas pautas nutricionales ayudan a obtener una dieta equilibrada 691

34.2 ¿Cómo se efectúa la digestión? 692

Generalidades de la digestión 692

En las esponjas la digestión se efectúa dentro de células individuales 693

Una bolsa con una abertura es el sistema digestivo más simple 693

La digestión en un tubo permite a los animales alimentarse con mayor frecuencia 693

Especializaciones digestivas 693

34.3 ¿Cómo digieren los alimentos los seres humanos? 695

El desdoblamiento mecánico y químico de los alimentos se inicia en la boca 695

El esófago conduce los alimentos al estómago 697

Casi toda la digestión se efectúa en el intestino delgado 698

GUARDIÁN DE LA SALUD Las úlceras digieren el tracto digestivo 699

Casi toda la absorción se efectúa en el intestino delgado 700

En el intestino grueso se absorbe agua y se forman heces 701

La digestión es controlada por el sistema nervioso y ciertas hormonas 701

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Adelgazar o morir? 702

35 El sistema urinario 706

ESTUDIO DE CASO Compatibilidad perfecta 707

35.1 ¿Cuáles son las funciones básicas de los sistemas urinarios? 708

35.2 ¿Cuáles son algunos ejemplos de sistemas excretores de invertebrados? 708

Los protonefridios filtran el líquido intersticial en los platelmintos 708

Los túbulos de Malpighi filtran la sangre de los insectos 709

Los nefridios de la lombriz de tierra filtran el líquido celómico 709

35.3 ¿Qué funciones tienen los sistemas urinarios de los vertebrados? 709

Los riñones de los vertebrados filtran la sangre 709

La excreción de los desechos nitrogenados está adaptada al ambiente 709

35.4 ¿Cuáles son las estructuras y funciones del aparato urinario humano? 710

El aparato urinario consta de riñones, uréteres, vejiga y uretra 710

La orina se forma en las nefronas de los riñones 710

El filtrado se convierte en orina en el túbulo de las nefronas 712

DE CERCA Las nefronas y la formación de orina 712

GUARDIÁN DE LA SALUD Cuando los riñones fallan 714

El asa de Henle permite la concentración de la orina 714

35.5 ¿Cómo ayudan los riñones de los mamíferos a conservar la homeostasis? 715

Los riñones liberan hormonas que ayudan a regular la presión arterial y los niveles de oxígeno de la sangre 715

Los riñones vigilan y regulan las sustancias disueltas en la sangre 716

Los riñones de los vertebrados están adaptados a diversos entornos 716

ENLACES CON LA VIDA ¿Demasiado líquido para beber? 717

36 Defensas contra la enfermedad 720

ESTUDIO DE CASO Lucha contra la gripe 721

36.1 ¿Cuáles son los mecanismos de defensa básicos contra la enfermedad? 722
- Los vertebrados tienen tres principales líneas de defensa 722
- Los invertebrados poseen las dos primeras líneas de defensa 722

36.2 ¿Cómo funcionan las defensas no específicas? 723
- La piel y las membranas mucosas forman barreras externas contra la invasión 723
- Defensas internas no específicas combaten a los microbios 723

36.3 ¿Qué características clave tiene la respuesta inmunitaria? 725
- Las células del sistema inmunitario reconocen al invasor 726
- Las células del sistema inmunitario lanzan un ataque 729
- Las células del sistema inmunitario recuerdan sus victorias anteriores 730

36.4 ¿Cómo logra la atención médica mejorar la respuesta inmunitaria? 730
- Las vacunas estimulan el desarrollo de células de memoria 730
- INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El descubrimiento de las vacunas 732
- Los antibióticos frenan la reproducción microbiana 732

36.5 ¿Qué sucede cuando el sistema inmunitario no funciona correctamente? 733
- Las alergias son respuestas inmunitarias mal dirigidas 733
- GUARDIÁN DE LA SALUD El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar? 734
- Una enfermedad autoinmune es una respuesta inmunitaria contra las moléculas del propio cuerpo 734
- Una enfermedad de deficiencia inmunitaria incapacita al sistema inmunitario 735
- El cáncer puede evadir o abatir la respuesta inmunitaria 736

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Lucha contra la gripe 738

37 Control químico del organismo animal: El sistema endocrino 740

ESTUDIO DE CASO Perder por el uso de hormonas artificiales 741

37.1 ¿Cómo se comunican las células animales? 742

37.2 ¿Qué características tienen las hormonas animales? 742
- Las hormonas locales se difunden hacia las células blanco adyacentes 742
- El torrente sanguíneo transporta las hormonas del sistema endocrino 742
- Las hormonas se unen a receptores específicos en las células blanco 743
- Mecanismos de retroalimentación regulan la liberación de hormonas 744
- Las hormonas endocrinas de vertebrados e invertebrados tienen asombrosas similitudes 746

37.3 ¿Qué estructuras y hormonas constituyen el sistema endocrino de los mamíferos? 746
- Las glándulas tiroides y paratiroides influyen en el metabolismo y en los niveles de calcio 750
- El páncreas es una glándula tanto exocrina como endocrina 752
- Los órganos sexuales secretan hormonas esteroides 752
- Las glándulas suprarrenales tienen dos partes que secretan hormonas distintas 753
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Engaño endocrino 754
- Otras fuentes de hormonas comprenden la glándula pineal, el timo, los riñones, el corazón, el tracto digestivo y las células grasas 755
- ENLACES CON LA VIDA Más cerca de la cura de la diabetes 756
- CONEXIONES EVOLUTIVAS La evolución de las hormonas 756

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Perder por el uso de hormonas artificiales 757

38 El sistema nervioso y los sentidos 760

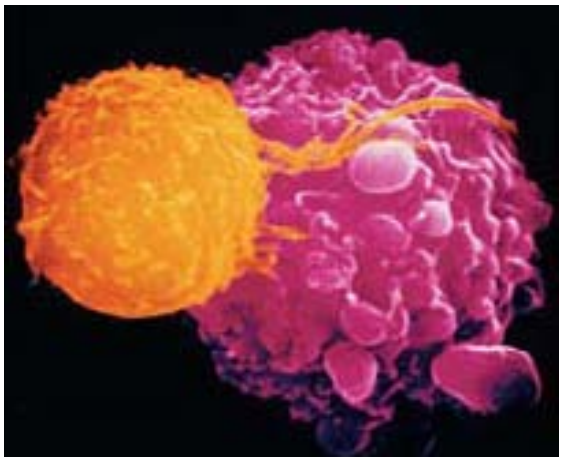
ESTUDIO DE CASO ¿Cómo te amo? 761

38.1 ¿Qué estructura y funciones tienen las neuronas? 762

38.2 ¿Cómo se genera y se transmite la actividad neuronal? 762
- Las neuronas generan voltajes eléctricos a través de sus membranas 762
- Las neuronas se comunican por las sinapsis 763

38.3 ¿Cómo se organizan los sistemas nerviosos? 764
- El procesamiento de la información en el sistema nervioso requiere de cuatro operaciones básicas 764
- DE CERCA Los iones y las señales eléctricas en las neuronas 766
- GUARDIÁN DE LA SALUD Drogas, enfermedades y neurotransmisores 769
- Los caminos neuronales dirigen el comportamiento 770
- Los sistemas nerviosos complejos están centralizados 770

38.4 ¿Cómo se organiza el sistema nervioso humano? 770
- El sistema nervioso periférico vincula al sistema nervioso central con el cuerpo 771
- El sistema nervioso central consiste en la médula espinal y el encéfalo 773
- La médula espinal es un cable de axones protegido por la espina dorsal 773
- El encéfalo consta de varias partes especializadas para desempeñar funciones específicas 774



38.5 ¿Cómo produce el encéfalo la mente? 778
El hemisferio izquierdo y el hemisferio derecho del cerebro se especializan en diferentes funciones 778
Dilucidar los mecanismos del aprendizaje y la memoria es el objetivo de profundas investigaciones 778
El conocimiento de cómo el cerebro crea la mente proviene de diversas fuentes 779
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Neuroimágenes: Una mirada al interior de la "caja negra" 780

38.6 ¿Cómo funcionan los receptores sensoriales? 781

38.7 ¿Cómo se detectan los estímulos mecánicos? 782

38.8 ¿Cómo se detecta el sonido? 782
El oído convierte las ondas sonoras en señales eléctricas 782

38.9 ¿Cómo se detecta la luz? 785
Los ojos compuestos de los artrópodos producen una imagen de mosaico 785
El ojo de los mamíferos capta y enfoca las ondas luminosas y las convierte en señales eléctricas 785

38.10 ¿Cómo se detectan las sustancias químicas? 788
Los receptores olfatorios detectan las sustancias químicas en el aire 788
Los receptores del gusto detectan las sustancias que entran en contacto con la lengua 789
El dolor es un sentido químico especializado 790
CONEXIONES EVOLUTIVAS Sentidos poco comunes 790
Ecolocalización 790
Detección de campos eléctricos 790
Detección de campos magnéticos 791

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Cómo te amo? 792

39 Acción y sostén: Los músculos y el esqueleto 796

ESTUDIO DE CASO Riesgos ocultos de los viajes espaciales 797

39.1 Una introducción a los sistemas muscular y esquelético 798

39.2 ¿Cómo trabajan los músculos? 798
La estructura y la función de las células de los músculos esqueléticos están íntimamente relacionadas 800
Las contracciones musculares son el resultado del deslizamiento de los filamentos gruesos y delgados 800
El músculo cardiaco acciona al corazón 804
El músculo liso produce contracciones lentas e involuntarias 804

39.3 ¿Qué función desempeña el esqueleto? 804
Entre los animales hay tres tipos de esqueletos 804
El esqueleto de los vertebrados desempeña muchas funciones 805

39.4 ¿Qué tejidos forman el esqueleto de los vertebrados? 806
El cartílago proporciona un sostén flexible y conexiones 806
El hueso brinda al cuerpo un armazón rígido y resistente 806
La remodelación ósea permite la reparación del esqueleto y su adaptación a las tensiones 807
GUARDIÁN DE LA SALUD Cómo se repara un hueso fracturado 808

39.5 ¿Cómo se mueve el cuerpo? 808
Los músculos mueven al esqueleto en torno a articulaciones flexibles 808
GUARDIÁN DE LA SALUD Osteoporosis: Cuando los huesos se vuelven quebradizos 810

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Riesgos ocultos de los viajes espaciales 810
ENLACES CON LA VIDA Caminar con un perro 811

40 Reproducción animal 814

ESTUDIO DE CASO El zoológico congelado 815

40.1 ¿Cómo se reproducen los animales? 816
La reproducción asexual no implica la fusión de espermatozoide y óvulo 816
La reproducción sexual requiere de la unión de un espermatozoide y un óvulo 817

40.2 ¿Cómo funciona el aparato reproductor humano? 820
La capacidad para reproducirse se inicia en la pubertad 820
El tracto reproductor masculino incluye los testículos y las estructuras accesorias 820
El tracto reproductor femenino comprende los ovarios y las estructuras accesorias 823
La cópula permite la fecundación interna 825
DE CERCA El control hormonal del ciclo menstrual 826
GUARDIÁN DE LA SALUD Enfermedades de transmisión sexual 828

40.3 ¿Cómo podemos limitar la fertilidad? 829
La esterilización es un método anticonceptivo permanente 829
La anticoncepción y el aborto evitan o ponen fin al embarazo 829
GUARDIÁN DE LA SALUD Reproducción con alta tecnología 831
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA En busca de un anticonceptivo masculino 832

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El zoológico congelado 832

41 Desarrollo animal 836

ESTUDIO DE CASO Los rostros del síndrome de alcoholismo fetal 837

41.1 ¿En qué difieren el desarrollo indirecto y el directo? 838
Durante el desarrollo indirecto, los animales sufren un cambio radical en la forma de su cuerpo 838

Los animales recién nacidos que tienen un desarrollo directo parecen adultos en miniatura 839

41.2 ¿Cómo procede el desarrollo animal? 840
Con la segmentación del cigoto se inicia el desarrollo 841
La gastrulación forma tres capas de tejidos 841
Las estructuras adultas se desarrollan durante la organogénesis 841

41.3 ¿Cómo se controla el desarrollo? 842
Cada célula contiene todos los planos genéticos del organismo 842
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA La promesa de las células madre 843
La transcripción genética se regula con precisión durante el desarrollo 844

41.4 ¿Cómo se desarrollan los seres humanos? 845
Durante los primeros dos meses, la diferenciación y el crecimiento son muy rápidos 845
La placenta secreta hormonas y permite el intercambio de materiales entre la madre y el embrión 848
El crecimiento y el desarrollo continúan durante los últimos siete meses 850
El desarrollo culmina con el parto y el alumbramiento 850
Las hormonas del embarazo estimulan la secreción de leche 851
GUARDIÁN DE LA SALUD La placenta sólo brinda una protección parcial 852
El envejecimiento es inevitable 852
ENLACES CON LA VIDA ¿Por qué el parto es tan difícil? 854

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Los rostros del síndrome de alcoholismo fetal 854

UNIDAD 6

Anatomía y fisiología de las plantas 857

42 Anatomía de las plantas y transporte de nutrimentos 858

ESTUDIO DE CASO ¿Por qué las hojas se tiñen de rojo en el otoño? 859

42.1 ¿Cómo está organizado el cuerpo de las plantas y cómo crecen? 860
Las fanerógamas consisten en un sistema de raíces y un sistema de vástago 860
Durante el crecimiento de una planta, células meristemáticas producen células diferenciadas 861

42.2 ¿Qué tejidos y tipos de células tienen las plantas? 862
El sistema de tejido dérmico cubre el cuerpo de la planta 862
El sistema de tejido fundamental constituye casi todo el cuerpo de las plantas jóvenes 863
El sistema de tejido vascular transporta agua y nutrimentos 864

42.3 ¿Cuáles son las estructuras y funciones de las hojas, las raíces y los tallos? 865

42.4 ¿Cómo obtienen nutrimentos las plantas? 873
Las raíces obtienen minerales del suelo 873
Las relaciones simbióticas ayudan a las plantas a obtener nutrimentos 873
DE CERCA ¿Cómo absorben agua y minerales las raíces? 874

42.5 ¿Cómo transportan las plantas el agua de las raíces a las hojas? 876
El movimiento del agua en el xilema se explica con la teoría de cohesión-tensión 876
Estomas ajustables controlan la intensidad de la transpiración 877
GUARDIÁN DE LA TIERRA Las plantas ayudan a regular la distribución del agua 878

42.6 ¿Cómo transportan azúcares las plantas? 879
La teoría de flujo-presión explica el movimiento de azúcares en el floema 879
CONEXIONES EVOLUTIVAS Adaptaciones especiales de raíces, tallos y hojas 880
Algunas raíces especializadas almacenan alimento; otras realizan fotosíntesis 880
Algunos tallos especializados producen plantas nuevas, almacenan agua o alimento, o bien, producen espinas o zarcillos 880
Hojas especializadas conservan y almacenan agua y alimentos e incluso capturan insectos 881

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Por qué las hojas se tiñen de rojo en el otoño? 883

43 Reproducción y desarrollo de las plantas 886

ESTUDIO DE CASO ¿Hermoso? sí, pero ¿caliente? 887

43.1 ¿Cuáles son las características fundamentales de los ciclos de vida de las plantas? 888
Las plantas participan en el sexo 888
La alternancia de generaciones es evidente en los helechos y los musgos 889

43.2 ¿Cómo se adapta la reproducción en las plantas con semilla a los ambientes secos? 889

43.3 ¿Cuál es la función y la estructura de las flores? 889
La mayoría de las flores atraen a los animales que las polinizan 889
GUARDIÁN DE LA SALUD

Las flores completas tienen cuatro partes principales 892
El polen contiene el gametofito masculino 892
El gametofito femenino se forma dentro del óvulo del ovario 895
La polinización de la flor permite la fecundación 895

43.4 ¿Cómo se desarrollan los frutos y las semillas? 896
El fruto se desarrolla a partir del ovario 896
La semilla se desarrolla a partir del óvulo 896
GUARDIÁN DE LA TIERRA Dodós, murciélagos y ecosistemas perturbados 898

43.5 ¿Cómo germinan y crecen las semillas? 899
El estado de latencia de las semillas ayuda a asegurar la germinación en el momento apropiado 899
En la germinación, la raíz surge primero, seguida del vástago 899
Los cotiledones nutren a la semilla germinada 899

43.6 ¿Cuáles son algunas adaptaciones para la polinización y la dispersión de semillas? 900
La coevolución pone en contacto a plantas y polinizadores 900
Los frutos ayudan a dispersar las semillas 903

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
¿Hermoso? sí, pero ¿caliente? 904

44 Respuestas de las plantas al ambiente 908

ESTUDIO DE CASO Plantas de rapiña 909

44.1 ¿Qué son las hormonas vegetales y cómo actúan? 910

44.2 ¿Cómo regulan las hormonas el ciclo de vida de las plantas? 911
El ciclo de vida de las plantas comienza con una semilla 911
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ¿Cómo se descubrieron las hormonas vegetales? 912
La auxina controla la orientación de la plántula que brota 913
La forma genéticamente determinada de la planta adulta es resultado de interacciones hormonales 915
La duración del día controla la floración 916
Las hormonas coordinan el desarrollo de semillas y frutos 918
La senectud y el estado de latencia preparan a la planta para el invierno 919

44.3 ¿Las plantas pueden comunicarse y moverse rápidamente? 920
Las plantas llaman a los "guardianes" cuando son atacadas 920
Las plantas podrían advertir a sus vecinos y a su descendencia de los ataques 920
Algunas plantas se mueven rápidamente 921

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Plantas de rapiña 922

Apéndice I: Conversiones del sistema métrico 925

Apéndice II: Clasificación de los principales grupos de organismos 926

Apéndice III: Vocabulario de biología: raíces, prefijos y sufijos de uso común 927

Glosario G1

Respuestas a las preguntas de pies de figura A1

Créditos fotográficos P1

Índice I1

Prefacio

Nuestros alumnos reciben y continuarán recibiendo un cúmulo de información científica, y muchas veces de información errónea, sobre una diversidad de temas: calentamiento global, cultivos manipulados mediante bioingeniería, investigación sobre células madre, enfermedad de las vacas locas y biodiversidad, entre muchos otros. En un campo en rápida expansión como el de la biología, ¿cómo se decide qué conceptos y hechos comunicar? ¿Qué tipo de conocimiento sobre biología ayudará mejor a los estudiantes a tomar decisiones informadas en relación con sus vidas, en el presente y en el futuro? ¿Qué conocimientos ayudarán a los estudiantes a prepararse mejor para los cursos más avanzados? Hemos revisado la octava edición de *Biología: La vida en la Tierra* reconociendo que no existen respuestas únicas a tales preguntas y con la idea de dar a los usuarios del libro mayores opciones.

Al consultar con educadores comprometidos en la emocionante pero desafiante misión de introducir a los alumnos en el campo de la biología, surgió un consenso: "Necesitamos ayudar a los estudiantes a estar informados en el terreno científico". El conocimiento científico da a un estudiante herramientas mentales para hacer frente al conocimiento en expansión. Esto requiere un fundamento de conocimiento fáctico que provea un marco cognoscitivo en el que pueda integrarse la nueva información. No obstante, el conocimiento científico también incluye la capacidad de captar y evaluar nuevos datos de los medios de información, como la prensa. Un individuo informado en el terreno científico reconoce la interrelación de los conceptos y la necesidad de integrar información proveniente de muchas áreas.

BIOLOGÍA: LA VIDA EN LA TIERRA COMUNICA DE MANERA EFICAZ LA RIQUEZA DE LA INFORMACIÓN CIENTÍFICA

La octava edición de *Biología: La vida en la Tierra* no sólo es un libro revisado y mejorado, sino un paquete completo de herramientas de aprendizaje para los estudiantes, y de enseñanza para los profesores. Nuestras principales metas son:

- Ayudar a los profesores a presentar la información sobre el tema en una forma que fomente el conocimiento científico entre los alumnos.
- Ayudar a los estudiantes a adquirir información de acuerdo con sus propios estilos de aprendizaje.
- Ayudar a los estudiantes a relacionar esta información con sus propias vidas, así como a comprender su importancia y relevancia.

BIOLOGÍA: LA VIDA EN LA TIERRA

…está organizado de manera clara y uniforme

En todos los capítulos, los alumnos encontrarán herramientas que les permitirán navegar a través de la información.

- Cada capítulo inicia con una sección "De un vistazo", en la que se presentan los principales apartados y ensayos de ese capítulo. Los profesores pueden asignar fácilmente —y los estudiantes podrán localizar— los temas clave dentro del capítulo.
- Las secciones principales se presentan con preguntas generales, mientras que los subtítulos son enunciados que resumen y reflejan su contenido más específico. Una importante meta pedagógica de esta organización es el énfasis en la biología como una jerarquía de conceptos interrelacionados, y no como un simple compendio de temas aislados e independientes.
- El "Resumen de conceptos clave" une importantes conceptos utilizando los títulos de mayor jerarquía en el capítulo, y su sistema de numeración permite a los profesores y estudiantes revisar la información de manera eficiente.
- Se incluyen preguntas al final de cada Estudio de caso, en muchos pies de figura, así como en la sección "Aplicación de conceptos". Estas características estimulan a los estudiantes a pensar acerca de la ciencia en vez de sólo memorizar los hechos.

…contiene ilustraciones mejoradas

A partir del consejo de los revisores y del cuidadoso escrutinio de los autores, una vez más hemos mejorado las ilustraciones. Para esta octava edición:

- ***Se agregaron y remplazaron muchas fotografías*** para ayudar a captar el interés del estudiante. La organización del libro, ahora más flexible, permitió incorporar fotografías de plantas y animales que antes sólo se describían en palabras.
- ***Continúa el énfasis en la consistencia del color*** Los colores se utilizan de manera consistente para ilustrar átomos, estructuras y procesos específicos.
- ***Se agregaron más figuras que ilustran procesos clave*** Además de volver a dibujar muchos diagramas para hacerlos más claros e interesantes, agregamos nuevas figuras que ilustran visualmente y concatenan procesos complejos, como el de la fotosíntesis y la respiración celular.
- ***Hay mayor claridad en los rótulos de las figuras*** Hemos agregado recuadros de texto dentro de las figuras para garantizar explicaciones más claras.
- ***Una vez más, en muchos pies de figura se incluyen preguntas que hacen reflexionar al estudiante*** Las respuestas a estas preguntas están disponibles por primera vez al final del libro.

…se actualizó y reorganizó

Incorporamos información acerca de descubrimientos científicos sobre los que los estudiantes quizás hayan leído en los periódicos; la información se ubica en el contexto científico para ayudar a consolidar su conocimiento. Aunque cada capítulo se revisó cuidadosamente, he aquí algunos puntos de interés de la octava edición:

- ***Unidad 1: La vida de la célula*** Nuevos casos introducen al estudiante en el terreno de la bioingeniería y le presentan los enigmáticos priones, responsables de la enfermedad de las vacas locas. En respuesta a las sugerencias de los revisores, hemos invertido el orden de presentación de los capí-

30, "Conservación de la biodiversidad de la Tierra", describe los servicios que prestan los ecosistemas y los intentos por calcular su valor para la humanidad. Se explica cómo las actividades humanas reducen la biodiversidad y se analiza cómo los esfuerzos de conservación y usos sustentables pueden preservar y restaurar los ecosistemas funcionales.

- ***Unidad 5: Anatomía y fisiología de los animales*** Esta unidad se inicia con una cobertura revisada de la homeostasis y la termorregulación. Los estudiantes encontrarán información nueva y actualizada sobre temas vigentes, que incluyen anorexia y obesidad, gripe aviar, la neuroquímica del amor, tecnología reproductiva, nuevos anticonceptivos, enfermedades de transmisión sexual, células madre y síndrome de alcoholismo fetal. Hemos conservado nuestro enfoque en el ser humano brindando información comparativa, nuevos temas como el intercambio de gases contracorriente en los peces, los túbulos de Malpighi en los insectos y nuevas secciones sobre las hormonas y las defensas contra las enfermedades de los invertebrados.

Unidad 2: Herencia

- ***Unidad 6: Anatomía y fisiología de las plantas*** Esta unidad hace alarde de muchas figuras revisadas y nuevas fotos para ilustrar mejor la anatomía y los procesos fisiológicos de las plantas, así como las fascinantes adaptaciones al ambiente. También se amplió la cobertura de los usos agrícolas de las hormonas vegetales.

…compromete y motiva a los estudiantes

Los estudiantes no pueden volverse letrados en ciencia por imposición; deben participar activamente en adquirir tanto la información como las destrezas necesarias para tal efecto. Por ello es crucial que los estudiantes reconozcan que la biología se refiere a sus vidas personales y a la vida a su alrededor. Para ayudar a los estudiantes a comprometerse y a sentirse motivados, esta nueva edición continúa ofreciendo las siguientes características:

Unidad 3: Evolución y diversidad de la vida

- ***Enlaces con la vida*** La breve sección "Enlaces con la vida", escrita de manera informal, se relaciona con temas que son familiares al estudiante, a la vez que relevantes para el capítulo.
- ***Estudios de caso*** En esta octava edición, hemos conservado y actualizado los estudios de caso más relevantes, al tiempo que se introdujeron otros nuevos. Los estudios de caso se basan en asuntos de actualidad, situaciones que atañen a los estudiantes o temas de biología particularmente fascinantes. Al final de cada capítulo, la sección "Otro vistazo al estudio de caso" permite a los estudiantes explorar el tema más a fondo a la luz de lo que aprendieron. Los estudiantes también encontrarán una investigación con mayor profundidad de cada estudio de caso en el sitio Web de este libro.

Unidad 4: Comportamiento y ecología

- ***Bioética*** Muchos temas explorados en el texto tienen implicaciones éticas para la vida humana. Entre ellos se incluyen la ingeniería genética y la clonación, el uso de animales en investigaciones y el efecto de las actividades humanas en otras especies. Ahora están identificados con un icono de bioética que alerta a los estudiantes y profesores sobre la posibilidad de discutir e investigar más ampliamente.
- ***Ensayos*** Conservamos el conjunto completo de ensayos en esta edición. Los recuadros "Guardián de la Tierra" exploran asuntos ambientales de actualidad, mientras que las secciones "Guardián de la salud" se ocupan de temas mé-

dicos. Los ensayos De cerca permiten a los profesores explorar temas selectos con mayor detalle; las secciones "Investigación científica" explican cómo se adquiere el conocimiento científico. Los ensayos bajo el título "Conexiones evolutivas" cierran algunos de los capítulos ubicando los temas en un contexto evolutivo.

…ofrece diferentes medios y complementos

- ***Instructor Resource Center*** Ningún otro libro de texto para este curso ofrece tantas opciones y tanta innovación y calidad en el apoyo al profesor. Los recursos incluyen todo el trabajo de arte del libro (con rótulos, sin rotular y susceptible de editarse), en formato JPEG y en varios archivos de PowerPoint ® que incluyen presentaciones del capítulo, así como cientos de animaciones en segunda y tercera dimensión y simulaciones para hacer presentaciones en PowerPoint ®.
- *Además incluye l*a colección más prestigiada de preguntas de examen en esta materia, revisada y actualizada.
- ***Companion Web site with Grade Tracker* (www.pearsoneducacion.net/audesirk)** Este sitio Web en inglés está disponible las 24 horas los 7 días de la semana y se enfoca en herramientas de estudio para ayudar a los estudiantes a dominar los conceptos del curso. El sitio incluye una guía de orientación *online* para organizar el estudio, cuestionarios de los capítulos para ayudar a los alumnos a determinar qué tan bien conocen la información y 103 tutoriales Web que presentan animaciones y actividades para ayudar a explicar los conceptos más desafiantes en cada capítulo.

RECONOCIMIENTOS

Biología: La vida en la Tierra es en verdad un trabajo de equipo. Nuestra editora de desarrollo Anne Scanlan-Rohrer buscó maneras de hacer el texto más claro, consistente y amigable para los alumnos. El director de arte John Christiana desarrolló y realizó un diseño fresco para esta nueva edición, y la editora de arte Rhonda Aversa coordinó hábilmente el trabajo con las ilustraciones. Las nuevas y mejoradas ilustraciones fueron diseñadas por Artworks con la ayuda de Jay McElroy. La investigadora de fotografía Ivonne Gerin buscó incansablemente fotografías excelentes. Christianne Thillen realizó el trabajo de corrección con meticulosa atención a los detalles. Tim Flem, nuestro editor de producción, reunió el trabajo de arte, las fotografías y el texto en una obra perfectamente integrada y aceptó los cambios de último momento con admirable buen ánimo. El editor de medio Patrick Shriner y la asistente de edición Crissy Dudonis coordinaron la producción de todos los medios y materiales auxiliares de estudio que hicieron posible el paquete completo de *Biología: La vida en la Tierra*. El director de marketing, Mandy Jellerichs, ayudó a crear la estrategia de marketing que comunicara de la manera más eficaz posible nuestro mensaje a la audiencia. Los editores Teresa Chung y Jeff Howard dirigieron el proyecto con energía e imaginación. Agradecemos a Teresa su fe inquebrantable en el proyecto y por reunir un fantástico equipo que lo pusiera en marcha. También agradecemos a Jeff por llevar este enorme proyecto a término con paciencia y destreza.

TERRY Y GERRY AUDESIRK
BRUCE E. BYERS

REVISORES DE LA OCTAVA EDICIÓN

George C. Argyros, *Northeastern University*
Peter S. Baletsa, *Northwestern University*
John Barone, *Columbus State University*
Michael C. Bell, *Richland College*
Melissa Blamires, *Salt Lake Community College*
Robert Boyd, *Auburn University*
Michael Boyle, *Seattle Central Community College*
Matthew R. Burnham, *Jones County Junior College*
Nicole A. Cintas, *Northern Virginia Community College*
Jay L. Comeaux, *Louisiana State University*
Sharon A. Coolican, *Cayuga Community College*
Mitchell B. Cruzan, *Portland State University*
Lewis Deaton, *University of Louisiana-Lafayette*
Dennis Forsythe, *The Citadel*
Teresa L. Fulcher, *Pellissippi State Technical Community College*
Martha Groom, *University of Washington*
Richard Hanke, *Rose State College*
Kelly Hogan, *University of North Carolina-Chapel Hill*
Dale R. Horeth, *Tidewater Community College*
Joel Humphrey, *Cayuga Community College*
James Johnson, *Central Washington University*
Joe Keen, *Patrick Henry Community College*
Aaron Krochmal, *University of Houston-Downtown*
Stephen Lebsack, *Linn-Benton Community College*
David E. Lemke, *Texas State University*
Jason L. Locklin, *Temple College*
Cindy Malone, *California State University-Northridge*
Mark Manteuffel, *St. Louis Community College*
Steven Mezik, *Herkimer County Community College*
Christine Minor, *Clemson University*
Lee Mitchell, *Mt. Hood Community College*
Nicole Moore, *Austin Peay University*
James Mulrooney, *Central Connecticut State University*
Charlotte Pedersen, *Southern Utah University*
Robert Kyle Pope, *Indiana University South Bend*
Kelli Prior, *Finger Lakes Community College*
Jennifer J. Quinlan, *Drexel University*
Robert N. Reed, *Southern Utah University*
Wenda Ribeiro, *Thomas Nelson Community College*
Elizabeth Rich, *Drexel University*
Frank Romano, *Jacksonville State University*
Amanda Rosenzweig, *Delgado Community College*
Marla Ruth, *Jones County Junior College*
Eduardo Salazar, *Temple College*

Brian W. Schwartz, *Columbus State University*
Steven Skarda, *Linn-Benton Community College*
Mark Smith, *Chaffey College*
Dale Smoak, *Piedmont Technical College*
Jay Snaric, *St. Louis Community College*
Phillip J. Snider, *University of Houston*
Gary Sojka, *Bucknell University*
Nathaniel J. Stricker, *Ohio State University*
Martha Sugermeyer, *Tidewater Community College*
Peter Svensson, *West Valley College*
Sylvia Torti, *University of Utah*
Rani Vajravelu, *University of Central Florida*
Lisa Weasel, *Portland State University*
Diana Wheat, *Linn-Benton Community College*
Lawrence R. Williams, *University of Houston*
Michelle Withers, *Louisiana State University*
Taek You, *Campbell University*
Martin Zahn, *Thomas Nelson Community College*
Izanne Zorin, *Northern Virginia Community College-Alexandria*

REALIZADORES Y REVISORES DE MEDIOS DE APOYO Y COMPLEMENTOS

Tamatha Barbeau, *Francis Marion University*
Linda Flora, *Montgomery County Community College*
Anne Galbraith, *University of Wisconsin-La Crosse*
Christopher Gregg, *Louisiana State University*
Theresa Hornstein, *Lake Superior College*
Dawn Janich, *Community College of Philadelphia*
Steve Kilpatrick, *University of Pittsburgh at Johnstown*
Bonnie L. King, *Quinnipiac University*
Michael Kotarski, *Niagara University*
Nancy Pencoe, *University of West Georgia*
Kelli Prior, *Finger Lakes Community College*
Greg Pryor, *Francis Marion University*
Mark Sugalski, *Southern Polytechnic State University*
Eric Stavney, *DeVry University*
Michelle D. Withers, *Louisiana State University*
Michelle Zurawski, *Moraine Valley Community College*

REVISORES DE EDICIONES PREVIAS

W. Sylvester Allred, *Northern Arizona University*
Judith Keller Amand, *Delaware County Community College*
William Anderson, *Abraham Baldwin Agriculture College*
Steve Arch, *Reed College*
Kerri Lynn Armstrong, *Community College of Philadelphia*
G. D. Aumann, *University of Houston*
Vernon Avila, *San Diego State University*
J. Wesley Bahorik, *Kutztown University of Pennsylvania*
Bill Barstow, *University of Georgia-Athens*
Colleen Belk, *University of Minnesota, Duluth*
Michael C. Bell, *Richland College*
Gerald Bergtrom, *University of Wisconsin*
Arlene Billock, *University of Southwestern Louisiana*
Brenda C. Blackwelder, *Central Piedmont Community College*
Raymond Bower, *University of Arkansas*
Marilyn Brady, *Centennial College of Applied Arts and Technology*
Virginia Buckner, *Johnson County Community College*
Arthur L. Buikema, Jr., *Virginia Polytechnic Institute*
J. Gregory Burg, *University of Kansas*
William F. Burke, *University of Hawaii*
Robert Burkholter, *Louisiana State University*
Kathleen Burt-Utley, *University of New Orleans*
Linda Butler, *University of Texas-Austin*
W. Barkley Butler, *Indiana University of Pennsylvania*
Jerry Button, *Portland Community College*
Bruce E. Byers, *University of Massachusetts-Amherst*
Sara Chambers, *Long Island University*
Nora L. Chee, *Chaminade University*
Joseph P. Chinnici, *Virginia Commonwealth University*
Dan Chiras, *University of Colorado-Denver*
Bob Coburn, *Middlesex Community College*
Joseph Coelho, *Culver Stockton College*
Martin Cohen, *University of Hartford*
Walter J. Conley, *State University of New York at Potsdam*
Mary U. Connell, *Appalachian State University*
Jerry Cook, *Sam Houston State University*
Joyce Corban, *Wright State University*
Ethel Cornforth, *San Jacinto College-South*
David J. Cotter, *Georgia College*
Lee Couch, *Albuquerque Technical Vocational Institute*
Donald C. Cox, *Miami University of Ohio*
Patricia B. Cox, *University of Tennessee*
Peter Crowcroft, *University of Texas--Austin*
Carol Crowder, *North Harris Montgomery College*
Donald E. Culwell, *University of Central Arkansas*
Robert A. Cunningham, *Erie Community College, North*
Karen Dalton, *Community College of Baltimore County-Catonsville Campus*
Lydia Daniels, *University of Pittsburgh*
David H. Davis, *Asheville-Buncombe Technical Community College*
Jerry Davis, *University of Wisconsin-La Crosse*
Douglas M. Deardon, *University of Minnesota*
Lewis Deaton, *University of Southwestern Louisiana*
Fred Delcomyn, *University of Illinois-Urbana*
David M. Demers, *University of Hartford*
Lorren Denney, *Southwest Missouri State University*
Katherine J. Denniston, *Towson State University*
Charles F. Denny, *University of South Carolina-Sumter*
Jean DeSaix, *University of North Carolina-Chapel Hill*
Ed DeWalt, *Louisiana State University*
Daniel F. Doak, *University of California-Santa Cruz*
Matthew M. Douglas, *University of Kansas*
Ronald J. Downey, *Ohio University*
Ernest Dubrul, *University of Toledo*
Michael Dufresne, *University of Windsor*

Susan A. Dunford, *University of Cincinnati*
Mary Durant, *North Harris College*
Ronald Edwards, *University of Florida*
Rosemarie Elizondo, *Reedley College*
George Ellmore, *Tufts University*
Joanne T. Ellzey, *University of Texas-El Paso*
Wayne Elmore, *Marshall University*
Thomas Emmel, *University of Florida*
Carl Estrella, *Merced College*
Nancy Eyster-Smith, *Bentley College*
Gerald Farr, *Southwest Texas State University*
Rita Farrar, *Louisiana State University*
Marianne Feaver, *North Carolina State University*
Susannah Feldman, *Towson University*
Linnea Fletcher, *Austin Community College-Northridge*
Charles V. Foltz, *Rhode Island College*
Dennis Forsythe, *The Citadel*
Douglas Fratianne, *Ohio State University*
Scott Freeman, *University of Washington*
Donald P. French, *Oklahoma State University*
Harvey Friedman, *University of Missouri-St. Louis*
Don Fritsch, *Virginia Commonwealth University*
Teresa Lane Fulcher, *Pellissippi State Technical Community College*
Michael Gaines, *University of Kansas*
Irja Galvan, *Western Oregon University*
Gail E. Gasparich, *Towson University*
Farooka Gauhari, *University of Nebraska-Omaha*
John Geiser, *Western Michigan University*
George W. Gilchrist, *University of Washington*
David Glenn-Lewin, *Iowa State University*
Elmer Gless, *Montana College of Mineral Sciences*
Charles W. Good, *Ohio State University-Lima*
Margaret Green, *Broward Community College*
David Grise, *Southwest Texas State University*
Lonnie J. Guralnick, *Western Oregon University*
Martin E. Hahn, *William Paterson College*
Madeline Hall, *Cleveland State University*
Georgia Ann Hammond, *Radford University*
Blanche C. Haning, *North Carolina State University*
Richard Hanke, *Rose State College*
Helen B. Hanten, *University of Minnesota*
John P. Harley, *Eastern Kentucky University*
William Hayes, *Delta State University*
Stephen Hedman, *University of Minnesota*
Jean Helgeson, *Collins County Community College*
Alexander Henderson, *Millersville University*
Timothy L. Henry, *University of Texas-Arlington*
James Hewlett, *Finger Lakes Community College*
Alison G. Hoffman, *University of Tennessee-Chattanooga*
Leland N. Holland, *Paso-Hernando Community College*
Laura Mays Hoopes, *Occidental College*
Michael D. Hudgins, *Alabama State University*
David Huffman, *Southwest Texas State University*
Donald A. Ingold, *East Texas State University*
Jon W. Jacklet, *State University of New York-Albany*
Rebecca M. Jessen, *Bowling Green State University*
J. Kelly Johnson, *University of Kansas*
Florence Juillerat, *Indiana University-Purdue University at Indianapolis*
Thomas W. Jurik, *Iowa State University*
Arnold Karpoff, *University of Louisville*
L. Kavaljian, *California State University*
Jeff Kenton, *Iowa State University*
Hendrick J. Ketellapper, *University of California, Davis*
Jeffrey Kiggins, *Blue Ridge Community College*
Harry Kurtz, *Sam Houston State University*
Kate Lajtha, *Oregon State University*
Tom Langen, *Clarkson University*
Patricia Lee-Robinson, *Chaminade University of Honolulu*
William H. Leonard, *Clemson University*
Edward Levri, *Indiana University of Pennsylvania*
Graeme Lindbeck, *University of Central Florida*
Jerri K. Lindsey, *Tarrant County Junior College-Northeast*
John Logue, *University of South Carolina-Sumter*
William Lowen, *Suffolk Community College*
Ann S. Lumsden, *Florida State University*
Steele R. Lunt, *University of Nebraska-Omaha*
Daniel D. Magoulick, *The University of Central Arkansas*
Paul Mangum, *Midland College*
Richard Manning, *Southwest Texas State University*
Ken Marr, *Green River Community College*
Kathleen A. Marrs, *Indiana University-Purdue University Indianapolis*
Michael Martin, *University of Michigan*
Linda Martin-Morris, *University of Washington*
Kenneth A. Mason, *University of Kansas*
Margaret May, *Virginia Commonwealth University*
D. J. McWhinnie, *De Paul University*
Gary L. Meeker, *California State University, Sacramento*
Thoyd Melton, *North Carolina State University*
Joseph R. Mendelson III, *Utah State University*
Karen E. Messley, *Rockvalley College*
Timothy Metz, *Campbell University*
Glendon R. Miller, *Wichita State University*
Hugh Miller, *East Tennessee State University*
Neil Miller, *Memphis State University*
Jeanne Mitchell, *Truman State University*
Jack E. Mobley, *University of Central Arkansas*
John W. Moon, *Harding University*
Richard Mortenson, *Albion College*
Gisele Muller-Parker, *Western Washington University*
Kathleen Murray, *University of Maine*
Robert Neill, *University of Texas*
Harry Nickla, *Creighton University*
Daniel Nickrent, *Southern Illinois University*
Jane Noble-Harvey, *University of Delaware*
David J. O'Neill, *Community College of Baltimore County-Dundalk Campus*
James T. Oris, *Miami University of Ohio*
Marcy Osgood, *University of Michigan*
C. O. Patterson, *Texas A&M University*
Fred Peabody, *University of South Dakota*
Harry Peery, *Tompkins-Cortland Community College*
Rhoda E. Perozzi, *Virginia Commonwealth University*
Gary B. Peterson, *South Dakota State University*
Bill Pfitsch, *Hamilton College*
Ronald Pfohl, *Miami University of Ohio*
Bernard Possident, *Skidmore College*
Ina Pour-el, *DMACC-Boone Campus*
Elsa C. Price, *Wallace State Community College*
Marvin Price, *Cedar Valley College*
James A. Raines, *North Harris College*
Paul Ramp, *Pellissippi State Technical College*
Mark Richter, *University of Kansas*
Robert Robbins, *Michigan State University*

Jennifer Roberts, *Lewis University*
Chris Romero, *Front Range Community College*
Paul Rosenbloom, *Southwest Texas State University*
K. Ross, *University of Delaware*
Mary Lou Rottman, *University of Colorado-Denver*
Albert Ruesink, *Indiana University*
Connie Russell, *Angelo State University*
Christopher F. Sacchi, *Kutztown University*
Doug Schelhaas, *University of Mary*
Brian Schmaefsky, *Kingwood College*
Alan Schoenherr, *Fullerton College*
Edna Seaman, *University of Massachusetts, Boston*
Patricia Shields, *George Mason University*
Marilyn Shopper, *Johnson County Community College*
Anu Singh-Cundy, *Western Washington University*
Linda Simpson, *University of North Carolina-Charlotte*
Russel V. Skavaril, *Ohio State University*
John Smarelli, *Loyola University*
Shari Snitovsky, *Skyline College*
John Sollinger, *Southern Oregon University*
Sally Sommers Smith, *Boston University*
Jim Sorenson, *Radford University*
Mary Spratt, *University of Missouri, Kansas City*
Bruce Stallsmith, *University of Alabama-Huntsville*
Benjamin Stark, *Illinois Institute of Technology*
William Stark, *Saint Louis University*
Barbara Stebbins-Boaz, *Willamette University*
Kathleen M. Steinert, *Bellevue Community College*
Barbara Stotler, *Southern Illinois University*
Gerald Summers, *University of Missouri-Columbia*
Marshall Sundberg, *Louisiana State University*
Bill Surver, *Clemson University*
Eldon Sutton, *University of Texas-Austin*
Dan Tallman, *Northern State University*
David Thorndill, *Essex Community College*
William Thwaites, *San Diego State University*
Professor Tobiessen, *Union College*
Richard Tolman, *Brigham Young University*
Dennis Trelka, *Washington and Jefferson College*
Sharon Tucker, *University of Delaware*
Gail Turner, *Virginia Commonwealth University*
Glyn Turnipseed, *Arkansas Technical University*
Lloyd W. Turtinen, *University of Wisconsin-Eau Claire*
Robert Tyser, *University of Wisconsin-La Crosse*
Robin W. Tyser, *University of Wisconsin-La Crosse*
Kristin Uthus, *Virginia Commonwealth University*
F. Daniel Vogt, *State University of New York-Plattsburgh*
Nancy Wade, *Old Dominion University*
Susan M. Wadkowski, *Lakeland Community College*
Jyoti R. Wagle, *Houston Community College-Central*
Lisa Weasel, *Portland State University*
Michael Weis, *University of Windsor*
DeLoris Wenzel, *University of Georgia*
Jerry Wermuth, *Purdue University-Calumet*
Jacob Wiebers, *Purdue University*
Carolyn Wilczynski, *Binghamton University*
P. Kelly Williams, *University of Dayton*
Roberta Williams, *University of Nevada-Las Vegas*
Emily Willingham, *University of Texas-Austin*
Sandra Winicur, *Indiana University-South Bend*
Bill Wischusen, *Louisiana State University*
Chris Wolfe, *North Virginia Community College*
Stacy Wolfe, *Art Institutes International*
Colleen Wong, *Wilbur Wright College*
Wade Worthen, *Furman University*
Robin Wright, *University of Washington*
Brenda L. Young, *Daemen College*
Cal Young, *Fullerton College*
Tim Young, *Mercer University*

Acerca de los autores

TERRY Y GERRY AUDESIRK crecieron en Nueva Jersey, donde se conocieron como estudiantes de licenciatura. Después de casarse en 1970, se mudaron a California, donde Terry obtuvo su doctorado en ecología marina en la Universidad del Sur de California y Gerry obtuvo su doctorado en neurobiología en el Instituto Tecnológico de California. Como estudiantes de posdoctorado en los laboratorios marinos de la Universidad de Washington, colaboraron en trabajos sobre las bases neurales del comportamiento, empleando un molusco marino como sistema modelo.

Terry y Gerry son profesores eméritos de biología en la Universidad de Colorado en Denver, donde impartieron las cátedras de introducción a la biología y neurobiología de 1982 a 2006. En su laboratorio de investigación, financiado por los Institutos Nacionales de la Salud, investigaron cómo los niveles bajos de contaminantes ambientales dañan las neuronas y cómo los estrógenos las protegen.

Terry y Gerry comparten un profundo aprecio por la naturaleza y el aire libre. Les gusta excursionar en las Rocallosas, correr cerca de su casa al pie de las montañas al oeste de Denver y tratar de mantener un huerto a 2130 metros de altitud en presencia de alces y venados hambrientos. Pertenecen desde hace tiempo a numerosas organizaciones dedicadas a la conservación del ambiente. Su hija, Heather, ha dado un nuevo enfoque a sus vidas.

BRUCE E. BYERS, originario de la región central norte de Estados Unidos, se trasladó a las colinas del oeste de Massachusetts, y se incorporó como profesor del departamento de biología de la Universidad de Massachusetts, Amherst. Desde 1993 ha sido miembro del cuerpo docente de la UMass, donde también obtuvo su doctorado. Bruce imparte cursos de introducción a la biología para estudiantes de carreras de ciencias biológicas y de otros campos; también de ornitología y comportamiento animal.

Su eterna fascinación por las aves lo llevó a explorar científicamente su biología. Sus investigaciones actuales se centran en la ecología del comportamiento de las aves, sobre todo en la función y evolución de las señales vocales que usan para comunicarse. La búsqueda de vocalizaciones a menudo obliga a Bruce a salir al campo, donde puede encontrársele antes del amanecer, con grabadora en mano, esperando los primeros trinos del nuevo día.

Para Heather, Jack y Lori y en memoria de Eve y Joe

T. A. & G. A.

A Bob y Ruth, con gratitud

B. E. B.

UNIDAD 5

Anatomía y fisiología de los animales

El cuerpo animal es una exquisita expresión de la elegancia con la que la evolución ha vinculado la forma con la función. Todos los sistemas del cuerpo animal operan en concierto para mantener la vida.

CAPÍTULO

31 Homeostasis y organización del cuerpo animal

En esta escena de película, los viajeros espaciales se preparan para salir de sus cápsulas donde estuvieron en estado de animación suspendida durante todo el tiempo que duró el vuelo espacial. (Imagen en recuadro) El personal médico de un hospital en Alberta, Canadá, cuida los dedos congelados de Erika Nordby.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: ¿La vida suspendida?

31.1 Homeostasis: ¿Cómo regulan los animales su ambiente interno?

El ambiente interno se mantiene en un estado de continuidad dinámica

Los animales se clasifican por la forma en que regulan su temperatura corporal

Enlaces con la vida: ¿Calor o humedad?

Los sistemas de retroalimentación regulan las condiciones internas

Los sistemas internos del cuerpo actúan de manera coordinada

31.2 ¿Cómo está organizado el cuerpo animal?

Los tejidos animales se componen de células similares que desempeñan una función específica

Los órganos incluyen dos o más tipos de tejidos que interactúan

Los sistemas de órganos consisten en dos o más órganos que interactúan

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿La vida suspendida?

ESTUDIO DE CASO ¿LA VIDA SUSPENDIDA?

DESPUÉS DE PASAR DÉCADAS EN EL ESPACIO, los sensores de la nave detectan un planeta parecido a la Tierra. Las señales eléctricas activan las cápsulas de hibernación en las que descansan los jóvenes congelados e inmóviles. A medida que las cápsulas se van descongelando en forma gradual, los monitores cardiacos registran una actividad inicialmente lenta que luego va en aumento: el tórax comienza a subir y bajar, y los párpados se abren y se cierran. Estos viajeros del espacio, y del tiempo, observan a su alrededor y se encuentran momentáneamente aturdidos, hasta que poco a poco van recordando el momento en que se cerró la cubierta de la cápsula de hibernación cuando se inició su viaje espacial. Sonríen y se levantan un poco entumidos para comenzar su nueva vida.

Esta imagen de animación suspendida cautiva la imaginación y, por el momento, es mera fantasía. Pero más cerca de la realidad, el hecho de suspender la vida durante cierto periodo tiene urgentes implicaciones prácticas. Cada año, mientras miles de personas mueren esperando el trasplante de un órgano, cientos de órganos donados tienen que ser rechazados porque no logran sobrevivir el tiempo suficiente para trasplantarse. Por otra parte, decenas de miles de personas mueren por la falta de oxígeno causada por la pérdida de sangre, por un ataque al corazón o por un accidente cerebrovascular antes de que puedan recibir tratamiento médico. ¿Será posible que muchas de estas víctimas, así como los órganos donados, puedan someterse a un estado de animación suspendida en el cual las células casi no requieren oxígeno mientras se les transporta?

Durante mucho tiempo los biólogos se han sentido fascinados por la capacidad de hibernación de los mamíferos, que es casi la suspensión de la vida. Por ejemplo, la temperatura corporal de las ardillas en estado de hibernación se acerca a la del punto de congelamiento, mientras que sus tasas respiratorias y el ritmo de sus latidos cardiacos, así como el consumo de oxígeno, descienden casi en un 97 por ciento. ¿La vida de una persona también podría ponerse en estado de hibernación por medio del congelamiento? Algunos accidentes indican que sí es posible. En una noche fría poco antes del amanecer, con una temperatura bajo cero, en Alberta, Canadá, una madre desesperada seguía las pequeñas huellas que había dejado su hijita de 13 meses de edad, hasta que la encontró rígida, con su cara hacia abajo sobre la nieve. Erika Nordby no respiraba, su corazón no latía y su temperatura corporal era tan sólo de 16°C (hay que recordar que la temperatura normal es de 37°C). Los paramédicos le practicaron la resucitación cardiopulmonar y la cobijaron con una frazada caliente. Entonces el corazón de Erika comenzó a latir por sí solo. Al día siguiente, estaba vivaracha y tomando leche de su biberón (véase la imagen en el recuadro al inicio de este capítulo). Por otra parte, una esquiadora cayó a través de la capa de hielo en un lago noruego; a sus compañeros les llevó 80 minutos sacarla a la superficie. Su temperatura corporal era de 14°C, no respiraba y su corazón había dejado de latir. Después de 9 horas de labor de resucitación, el corazón de Anna Bagenholm comenzó a latir por sí solo; posteriormente su recuperación fue excelente.

¿Qué fue lo que sucedió a los cuerpos de Erika y de Anna cuando perdieron la batalla para conservarse calientes? ¿Por qué, si estuvieron clínicamente muertas durante cierto tiempo, ahora viven y están saludables? ¿El estado de animación suspendida inducido por congelamiento podría ser la clave para conservar vivos los órganos donados, así como a las personas que han estado privadas de oxígeno por haber sufrido un trauma o un accidente cerebrovascular?

31.1 HOMEOSTASIS: ¿CÓMO REGULAN LOS ANIMALES SU AMBIENTE INTERNO?

Ya sea que nos zambullamos en una alberca, caminemos por el desierto o nademos en el mar, nuestras células permanecen aisladas de las condiciones exteriores. Todas ellas están bañadas en líquido extracelular que contiene una compleja y muy específica mezcla de sustancias disueltas que debe mantenerse pese a las condiciones externas. Muchos animales han desarrollado complejos mecanismos fisiológicos que les permiten mantener condiciones internas precisas, a pesar de vivir todo el tiempo en ambientes hostiles. Por ejemplo, los habitantes del desierto, como la rata canguro, tienen riñones que les permiten conservar el agua, mientras que los animales de agua dulce, como la trucha o la rana, excretan abundantes cantidades de agua. Los peces oceánicos secretan el exceso de sal por las agallas. Puesto que las células del cuerpo animal no pueden sobrevivir si las condiciones del ambiente interno se salen de un intervalo estrecho de estados aceptables, las células dedican una porción considerable de su energía a acciones que buscan mantener la estabilidad del ambiente celular.

El primero en reconocer esta "constancia del medio interno" fue el fisiólogo francés Claude Bernard a mediados del siglo XIX. Posteriormente, en la década de 1920, Walter B. Cannon acuñó el término **homeostasis** para describir el proceso mediante el cual un organismo mantiene su ambiente interno dentro de un estrecho intervalo de condiciones necesarias para el óptimo funcionamiento de las células. Aunque la palabra *homeostasis* (que deriva del griego y significa "seguir igual") implica un estado estático, sin cambios, en realidad el ambiente interno bulle de actividad mientras el cuerpo se ajusta continuamente a cambios internos y externos.

El ambiente interno se mantiene en un estado de continuidad dinámica

El estado interno de un cuerpo animal puede describirse como un *equilibrio dinámico*. Ocurren muchos cambios físicos y químicos (el aspecto dinámico), pero el resultado neto de toda esta actividad es que los parámetros físicos y químicos se mantienen dentro del estrecho intervalo que las células requieren para funcionar (el aspecto constante). Ejemplos de las condiciones dentro del líquido que rodea a las células y que se regulan por mecanismos homeostáticos incluyen:

- temperatura
- niveles de agua y sal
- niveles de glucosa
- pH
- niveles de oxígeno y dióxido de carbono

¿Por qué las células son tan delicadas en relación con su ambiente? Como aprenderás en los siguientes capítulos de esta unidad, se requieren los niveles adecuados de varios tipos de sal para los procesos que sostienen la vida, como la actividad neuronal y la contracción muscular. Los requerimientos de energía y la dependencia de la compleja estructura tridimensional de las proteínas para regular las actividades metabólicas también restringen su ambiente.

En condiciones normales, las células animales generan y usan constantemente grandes cantidades de ATP para mantener los procesos vitales (véase el capítulo 8). Las reacciones que producen ATP (glucólisis seguida de la respiración celular) requieren de un abastecimiento continuo de moléculas de alta energía (principalmente glucosa) y también de oxígeno para completar la serie de reacciones que generan la mayor parte del ATP de la célula. Así, la producción de energía ayuda a explicar la importancia de los niveles de glucosa y oxígeno.

Cada una de las muchas reacciones que se requieren para generar ATP es catalizada por una proteína específica cuya capacidad de funcionamiento depende de manera fundamental de su estructura tridimensional, en parte mantenida mediante los puentes de hidrógeno. Estos puentes cruciales pero vulnerables sufren alteraciones en un ambiente demasiado caliente, demasiado salado, o bien, muy ácido o muy alcalino (véase el capítulo 3). La necesidad de mantener estos puentes y la función proteínica que depende de ellos ayuda a explicar la necesidad de un intervalo estrecho de temperatura, de pH y sal.

Como las temperaturas crecientes aceleran las reacciones químicas, las temperaturas elevadas aumentan la demanda de ATP, así como la velocidad a las que las células lo generan, lo que incrementa la necesidad de la célula de disponer de oxígeno y de glucosa. Cuando Anna cayó a través del hielo, se interrumpió su dotación de oxígeno. Por fortuna, la temperatura tan baja del agua redujo en forma drástica los requerimientos de oxígeno celulares, lo cual la mantuvo viva.

Los animales se clasifican por la forma en que regulan su temperatura corporal

Probablemente ya estás familiarizado con las descripciones de los mamíferos y las aves como animales "de sangre caliente", y de los reptiles, anfibios, peces e invertebrados como "de sangre fría". Sin embargo, el cuerpo del pez llamado perrito del desierto puede alcanzar más de 37.8°C cuando los estanques del desierto se calientan bajo el sol de verano, mientras que el cuerpo de los colibríes se enfría hasta alcanzar 12.8°C durante la noche para ahorrar energía (**FIGURA 31-1a, b**). Para evitar confusiones, los científicos a menudo clasifican a los animales de acuerdo con la fuente principal para su calentamiento corporal. Así, los animales son **endotérmicos** (del griego "calor interior") si producen la mayor parte de su calor por medio de reacciones metabólicas; las aves y mamíferos son endotérmicos. Unos cuantos peces, como el atún y algunos tiburones grandes, al igual que algunas mariposas y abejas también pueden calentar su cuerpo considerablemente por medio de su calor metabólico. Los animales son **ectotérmicos** (del griego "calor exterior") si obtienen la mayor parte de su calor del medio, por ejemplo, asoleándose (**FIGURA 31-1c**). Los reptiles, anfibios y la mayoría de los peces e invertebrados son ectotérmicos. En general, los endotérmicos tienen tasas metabólicas más elevadas que los ectotérmicos, lo que les permite mantener su cuerpo a temperaturas cálidas constantes. Debido a que sus cuerpos generan tanto calor, los endotérmicos, incluidos los seres humanos, se ven amenazados por condiciones en las cuales no pueden escapar del calor o enfriarse ellos mismos (véase la sección "Enlaces con la vida: ¿Calor o humedad?"). Los ectotérmicos por lo general tienen temperaturas corporales más bajas y más variables que los endotérmicos, porque dependen más del calor ambiental. Sin embargo, a través del comportamiento o por habitar en un ambiente muy constante, la temperatura corporal de los ectotérmicos tam-

FIGURA 31-1 ¿De sangre caliente o fría?
a) Puesto que los peces "de sangre fría" como este pez perrito del desierto pueden estar calientes, y ***b)*** los animales "de sangre caliente" como este colibrí pueden llegar a enfriarse bastante, los científicos prefieren clasificar a los animales como endotérmicos y ectotérmicos dependiendo de la fuente de calor corporal. ***c)*** Este lagarto que se asolea ilustra un mecanismo de comportamiento que utilizan los reptiles, que son ectotérmicos, para regular la temperatura corporal.

bién puede permanecer bastante estable. Por ejemplo, el pez perrito del desierto antes mencionado es capaz de tolerar temperaturas del agua de 2.2 a 45°C, pero puede procrear sólo dentro de un intervalo estrecho de temperaturas. Durante la estación de apareamiento, este perrito del desierto puede regular su temperatura con bastante precisión al nadar en diferentes áreas del estanque o en aguas termales según cambie la temperatura. En aguas profundas del mar, la temperatura es tan constante (alrededor de 3°C) que los peces ectotérmicos casi no experimentan ninguna variación en su temperatura corporal.

Puesto que las temperaturas más calientes aumentan la rapidez de las reacciones metabólicas, hay costos y beneficios al mantenerse caliente. Si el cuerpo se enfría (como sucede durante la noche), las mariposas y abejas no pueden volar, mientras que, en esas condiciones, los lagartos son demasiado lentos para cazar o para huir de los depredadores de manera eficiente. Estos animales ectotérmicos, y muchos otros, se calientan ellos mismos durante el día de manera que puedan realizar sus actividades normales. Las abejas se estremecen y las mariposas baten sus alas para generar calor metabólico, mientras que los lagartos buscan alguna piedra caliente por el sol. Después, al descansar en sitios resguardados durante la noche, sus cuerpos se enfrían y conservan la energía. La temperatura corporal diurna del colibrí de aproximadamente 41°C contribuye a su capacidad de batir las alas con la increíble rapidez de 80 veces por segundo, lo cual, a la vez, le permite revolotear precisamente donde puede extraer el néctar de las flores (figura 31-1b). Sin embargo, si estos endotérmicos trataran de mantener esta alta temperatura corporal durante una noche muy fría, agotarían sus reservas de energía y morirían de hambre. Así que cuando las noches son frías, un colibrí puede reducir su temperatura corporal y mantenerla 10°C más fría que durante el día.

ENLACES CON LA VIDA ¿Calor o humedad?

¡No es el calor, es la humedad! En realidad, la incomodidad que sientes en un día caluroso y sofocante es el resultado de estos dos factores. Los meteorólogos han desarrollado una fórmula, el índice calorífico, que permite obtener una "temperatura aparente" al tomar en cuenta la humedad. Por ejemplo, una temperatura de 32.2°C (90°F) tiene un índice calorífico de 37.8°C (100°F) a una humedad del 60 por ciento, pero se siente tan sólo como de 29.4°C (85°F) a una humedad del 10 por ciento. La temperatura del aire cercana a la temperatura corporal evita que el cuerpo irradie el exceso de calor que genera, mientras que la humedad elevada mina la capacidad del cuerpo para enfriarse por medio del sudor. El calor y la humedad juntos alteran los intentos del cuerpo para mantener el intervalo estrecho de la temperatura que activa la homeostasis.

En casos extremos, el calor excesivo puede causar una condición mortal llamada *hipertermia* o insolación. Aunque cualquiera puede sucumbir a ésta, los ancianos y los niños son los más susceptibles porque su capacidad para regular la temperatura corporal es menos eficiente. Durante la insolación, se alteran los mecanismos homeostáticos del cuerpo, pues la temperatura corporal se eleva a 41.1°C (105°F) o más, se produce deshidratación, cesa la sudoración y se pierde la percepción de sed. En Estados Unidos docenas de niños mueren cada verano al quedarse encerrados en automóviles bajo los rayos del sol, donde la temperatura alcanza niveles mortales en el breve lapso de 15 minutos.

Cuando te quejes por el calor y la humedad en el próximo verano, recuerda que tu malestar se ha desarrollado como un sistema de alerta que te indica que la homeostasis está amenazada. Así que date un baño, busca una sombra donde resguardarte o un sitio con aire acondicionado y bebe un vaso grande de agua fresca.

Los sistemas de retroalimentación regulan las condiciones internas

El ambiente interno de un organismo se mantiene por un sinnúmero de mecanismos que, en conjunto, se denominan *sistemas de retroalimentación.* Los *sistemas de retroalimentación negativa* contrarrestan los efectos de cambios en el ambiente interno y son los responsables de mantener la homeostasis. Los *sistemas de retroalimentación positiva* también ocurren en los organismos e impulsan cambios rápidos y autolimitantes, parecidos a los que ocurren cuando una madre da a luz.

La retroalimentación negativa revierte los efectos de los cambios

El mecanismo más importante que rige la homeostasis es la **retroalimentación negativa**, en la cual un cambio en el ambiente provoca una respuesta que "retroalimenta" y contrarresta ese cambio. El resultado general de la retroalimentación negativa es el de hacer que el sistema regrese a su condición original contrarrestando el cambio inicial (FIGURA 31-2).

Un ejemplo muy conocido de retroalimentación negativa es el termostato de una casa. En un termostato, un termómetro detecta un estímulo (descenso de la temperatura por debajo de un *valor establecido* o *punto de referencia*, es decir, el ajuste del termostato) y envía una señal a un dispositivo de control que enciende un calefactor. Éste restaura la temperatura al valor establecido y el calefactor se apaga. La continua repetición de los ciclos de encendido y apagado mantiene la temperatura de la casa cerca del valor establecido. Observa que el ascenso y descenso de la temperatura alrededor del valor establecido produce un equilibrio dinámico parecido al del cuerpo de los animales, en vez de una temperatura absoluta constante. El mecanismo de retroalimentación negativa del termostato requiere de un *centro de control* con un valor establecido, un *sensor* (el termómetro) y un *efector* (la caldera) que realiza el cambio.

La retroalimentación negativa mantiene la temperatura corporal

¿Cómo mantienen las personas y otros animales endotérmicos su temperatura interna, a pesar de las fluctuaciones extremas de la temperatura a su alrededor, como las que experimentó Erika en medio de la nieve durante una noche de invierno en Canadá? El punto de referencia en el sistema de control de la temperatura, que varía en menos de 1°C en el ser humano sano, se establece en un centro de control del *hipotálamo,* una región del cerebro que controla muchas respuestas homeostáticas. Las terminaciones nerviosas del hipotálamo, el abdomen, la médula espinal, la piel y las venas grandes actúan como sensores de temperatura y transmiten la información al hipotálamo. Cuando baja la temperatura del cuerpo, el hipotálamo activa diversos mecanismos efectores que elevan esa temperatura. Cuando se restablece la temperatura normal del cuerpo, los sensores avisan al hipotálamo que desactive esos mecanismos de control de la temperatura. Por ejemplo, sin duda Erika comenzó a temblar tan pronto como salió de su casa y comenzó a caminar en medio de la nieve. Este estremecimiento tiene su origen en contracciones rápidas de los músculos esqueléticos para quemar el combustible almacenado en ellos y generar calor (figura 31-2b). Los vasos sanguíneos que alimentan las áreas no vitales del cuerpo (como cara, manos, pies y piel) experimentaron una constricción en el caso de Erika, lo que redujo la pérdida de calor y desvió la sangre caliente a las regiones vitales internas (cerebro, corazón y otros órganos internos). Entonces, su hipotálamo inició una serie de señales químicas que elevaron la tasa metabólica, generando más calor para mantener las funciones vitales. Pero con reservas energéticas limitadas y un cuerpo pequeño con una extensa área superficial, la temperatura de la niña descendió rápidamente. Por debajo de los 29°C, la actividad del hipotálamo se redujo hasta el punto en que ya no fue capaz de controlar la temperatura corporal.

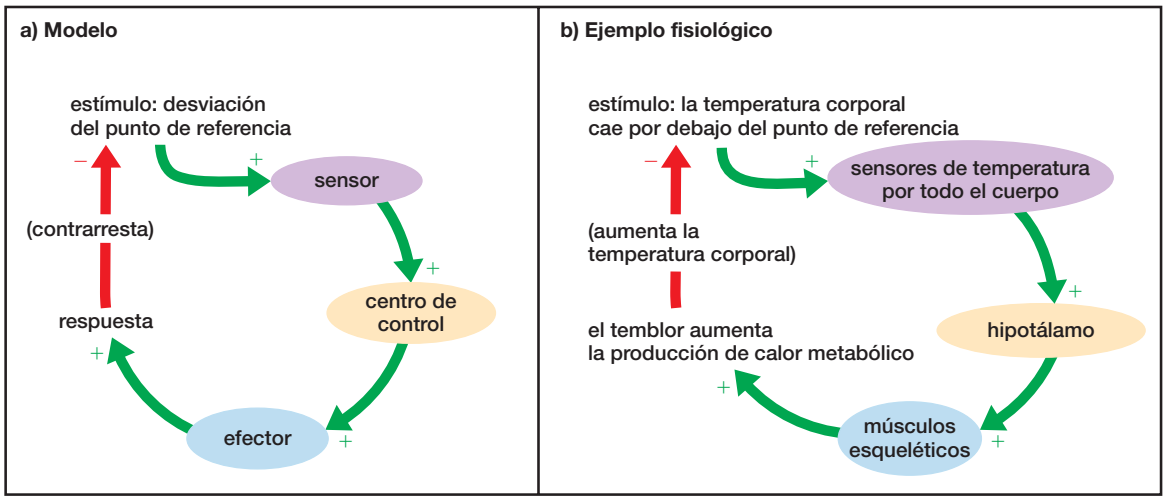


FIGURA 31-2 La retroalimentación negativa mantiene la homeostasis
La retroalimentación negativa mantiene el valor establecido o punto de referencia empleando un sensor para detectar una desviación respecto del mismo (es decir, un estímulo). El receptor envía una señal al centro de control, el cual activa un mecanismo efector para contrarrestar el estímulo. PREGUNTA: ¿Qué sucedería si un mamífero cuyo cuerpo está frío y tembloroso ingiriera un veneno que destruyera todas las terminales nerviosas del cuerpo que detectan el calor?

Hay muchos mecanismos de retroalimentación negativa en los sistemas fisiológicos. En los siguientes capítulos presentaremos muchos ejemplos de control homeostático que operan por retroalimentación negativa, como los sistemas que regulan el contenido de oxígeno en la sangre, el equilibrio del agua, los niveles de azúcar en la sangre y muchos otros componentes del "medio interno".

La retroalimentación positiva impulsa ciertos sucesos fisiológicos a corto plazo

A primera vista, la retroalimentación positiva es un concepto un tanto pavoroso, pues un cambio en un sistema de **retroalimentación positiva** produce una respuesta que intensifica el cambio original. La retroalimentación positiva, obviamente, tiende a crear reacciones en cadena. Por ejemplo, en la fisión nuclear, cada partícula que se separa de un átomo provoca la división de otro átomo, cuyos fragmentos causan la división de otros átomos, y así sucesivamente. Si se deja deliberadamente sin control, la energía liberada por esta reacción en cadena es responsable de la devastación que produce una bomba atómica. Un ejemplo biológico conocido de retroalimentación positiva tiene lugar cuando los miembros de una población tienen, en promedio, más hijos de los que se necesitan para remplazar a los progenitores, lo que provoca que la población crezca exponencialmente. El ecólogo Paul Ehrlich acuñó la acertada expresión de "bomba demográfica" para describir el crecimiento no controlado de una población. La retroalimentación negativa, finalmente, termina con los procesos impulsados por la retroalimentación positiva. Con el tiempo, la bomba atómica se quedará sin átomos para continuar la división, y las poblaciones en aumento se quedarán sin alimento o sin espacio dónde vivir.

La retroalimentación positiva produce el trabajo de parto y el alumbramiento

En los sistemas fisiológicos, los sucesos regidos por mecanismos de retroalimentación positiva suelen ser autolimitantes y relativamente poco comunes. Hay retroalimentación positiva, por ejemplo, durante el parto. Las primeras contracciones del parto comienzan a empujar la cabeza del bebé contra el cuello de la matriz, situado en la base del útero; esta presión hace que el cuello se dilate (se abra). Neuronas receptoras de estiramiento en el cuello de la matriz responden a esta expansión enviando una señal al hipotálamo, el cual responde activando la liberación de una hormona (oxitocina) que estimula contracciones uterinas cada vez más numerosas y fuertes. Estas contracciones crean mayor presión contra el cuello de la matriz, lo que, a la vez, propicia la liberación de más hormonas. El nacimiento del bebé pone fin a la presión sobre el cuello de la matriz, dando una retroalimentación negativa que detiene el ciclo de retroalimentación positiva.

Los sistemas internos del cuerpo actúan de manera coordinada

Por fortuna, la evolución se ha asegurado de que los diversos sistemas colaboren. Por ejemplo, los sistemas que introducen sustancias al cuerpo actúan en coordinación con los sistemas encargados de transportar sustancias dentro del cuerpo y de eliminarlas. Cada célula del cuerpo está conectada de forma indirecta con todas las demás mediante una compleja red de vasos sanguíneos y nervios que pueden llevar moléculas y mensajes a los sitios apropiados. Para mantener la homeostasis, las señales químicas actúan sólo sobre las células blanco que se especializan en recibir y responder a señales específicas. Con frecuencia hay muchos otros eslabones en esta cadena de comunicación. La exposición al frío, por ejemplo, hace que el hipotálamo libere señales químicas que viajan por el torrente sanguíneo hacia una glándula cercana (la hipófisis o pituitaria). La glándula hipófisis entonces libera una hormona que hace que trabaje la glándula tiroides y libere una hormona diferente. Esta hormona actúa para aumentar la tasa metabólica del cuerpo, lo que genera más calor. El hipotálamo detiene la liberación de la señal química cuando sus receptores de la temperatura sanguínea indican que la temperatura corporal ha regresado a su estado normal. Así, al usar una variedad de rutas y mecanismos, los mensajes son transportados desde los sensores a los efectores y de regreso otra vez, lo que permite a los mecanismos de retroalimentación negativa mantener la homeostasis.

31.2 ¿CÓMO ESTÁ ORGANIZADO EL CUERPO ANIMAL?

A partir de las células simples que viven libremente, el cambio evolutivo ha producido asombrosos sistemas complejos que consisten en billones de células especializadas que llevan a cabo cientos de funciones de manera simultánea. Todas las partes embonan unas con otras con tal grado de precisión e integración que en la actualidad los ingenieros todavía sueñan con imitarlas. Esta complejidad se basa en una jerarquía organizacional simple:

células → tejidos → órganos → sistemas de órganos

Un ejemplo de esta jerarquía se ilustra en la **FIGURA 31.3**. Como aprendiste en el capítulo 1, las células son los bloques de construcción de toda forma de vida. El cuerpo de un animal incorpora células para formar **tejidos**, cada uno de los cuales se compone de docenas a miles de millones de células estructuralmente similares que actúan de manera coordinada para llevar a cabo una función específica. Los tejidos son los bloques de construcción de los **órganos**, las estructuras discretas que desempeñan funciones complejas. Ejemplos de órganos incluyen el estómago, el intestino delgado, los riñones y la vejiga urinaria. A la vez, los órganos están organizados en **sistemas**, que son grupos de órganos que funcionan de forma coordinada. Por ejemplo, el sistema digestivo incluye el estómago, el intestino delgado, el intestino grueso y otros órganos que trabajan en conjunto para permitirnos digerir los alimentos y absorber los nutrimentos contenidos en ellos. Los grandes sistemas de órganos de los vertebrados se ilustran en la tabla 31-1.

Los tejidos animales se componen de células similares que desempeñan una función específica

Un tejido se compone de células con estructura similar, diseñadas para desempeñar una función especializada. Los tejidos

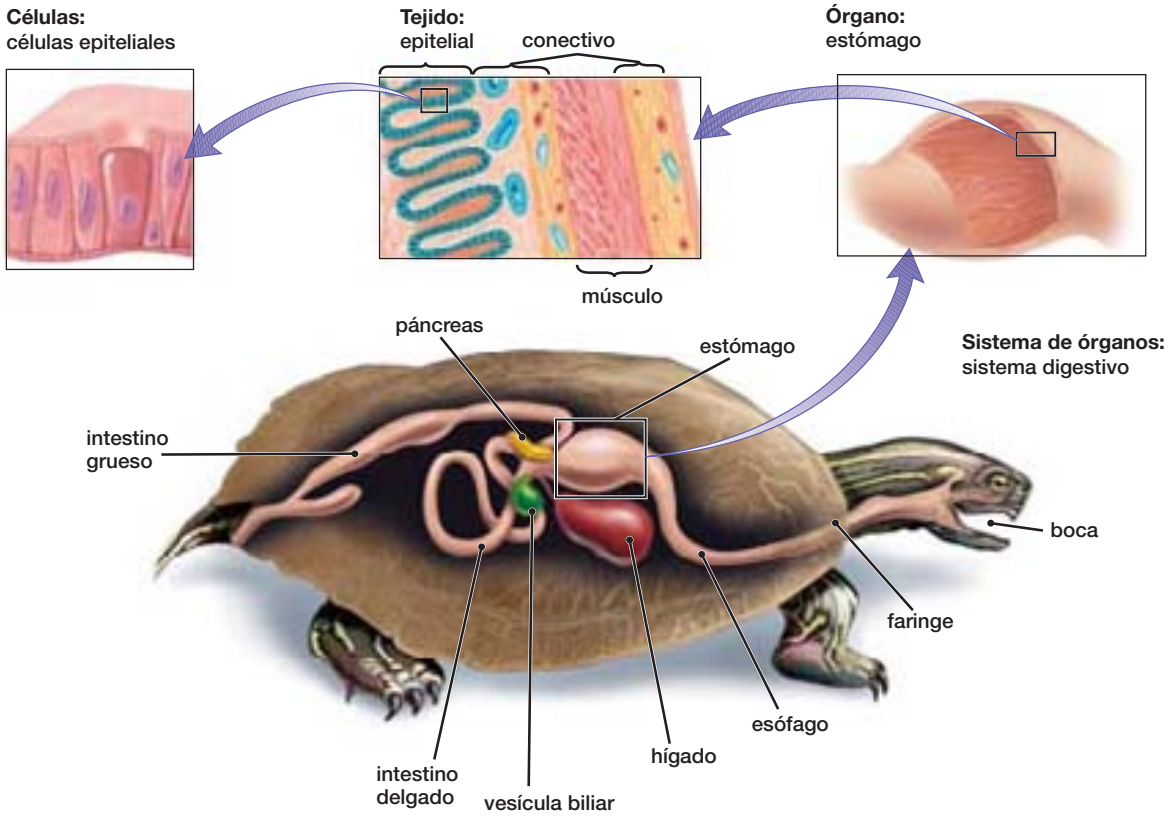


FIGURA 31-3 Células, tejidos, órganos y sistemas de órganos
El cuerpo animal está compuesto de células, que forman tejidos, los cuales se combinan para constituir órganos que trabajan en perfecta armonía como sistemas de órganos.

también pueden incluir componentes extracelulares producidos por esas células, como en el caso del cartílago y el hueso. Aquí presentaremos un breve panorama de las cuatro categorías principales de tejidos animales y de los cuatro tipos principales de células que componen esos tejidos: tejido epitelial, tejido conectivo, tejido muscular y tejido nervioso.

El tejido epitelial cubre al cuerpo, reviste sus cavidades y forma glándulas

El **tejido epitelial** consiste en una o más capas de células epiteliales densamente apretadas, soportadas por una capa extracelular, la *lámina basal*, compuesta de colágeno y otras proteínas fibrosas (**FIGURA 31-4**). Existe una variedad de tipos de tejido epitelial, cada uno adaptado a una función particular. El tejido epitelial cubre toda la parte externa del cuerpo y reviste todas sus cavidades internas, incluidos los tractos digestivo y respiratorio, el corazón y los vasos sanguíneos, los órganos reproductores y los órganos del sistema urinario.

El tejido epitelial a menudo se clasifica por sus capas celulares: el *epitelio simple* tiene el espesor de una sola célula y recubre al tracto respiratorio, buena parte del tracto digestivo y del sistema circulatorio. El *epitelio estratificado*, cuyo espesor es de varias células, puede soportar desgastes y desgarres considerables; se encuentra en la boca y en la piel. Dentro de cada una de estas categorías encontramos especializaciones adicionales. Por ejemplo, el epitelio simple que recubre los pulmones consiste en una sola capa de células delgadas y planas cuya forma las hace ideales para permitir la difusión rápida de los gases (figura 31-4a). El epitelio simple que recubre la tráquea es en realidad bastante complejo, consiste tanto en células cortas como alargadas con cilios, entremezcladas con *células caliciformes* glandulares que secretan mucosidad (figura 31-4b). La mucosa atrapa las impurezas inhaladas y los cilios las arrojan fuera de la tráquea. El epitelio estratificado de la piel está cubierto por muchas capas de células muertas. Éstas y las células epiteliales subyacentes están fuertemente enlazadas por medio de una proteína resistente y elástica (la *queratina*) que hace que la piel sea flexible, impermeable y relativamente resistente (figura 31-4c).

Una propiedad importante de las células epiteliales es que continuamente se pierden y se reponen por división celular mitótica. Por ejemplo, consideremos el desgaste que sufre el epitelio que reviste la boca. El epitelio, quemado por café caliente y raspado por las rosetas de maíz, quedaría destruido en cuestión de días si no se estuviera reponiendo continuamente. El revestimiento del estómago, raspado por los alimentos y atacado por ácidos y enzimas que digieren proteínas, se repone por completo cada dos o tres días. La membrana exterior de la piel, la epidermis (figura 31-4c), se renueva unas dos veces al mes.

Las **glándulas** son células o grupos de células que se especializan en secretar (liberar) grandes cantidades de sustancias fuera de la célula. Todas las glándulas se componen de células epiteliales especializadas. Algunas glándulas son células únicas, como las que secretan la mucosidad del epitelio traqueal (véase la figura 31-4b). La mayor parte de las glándulas son multicelulares, incluidas las que secretan saliva, sudor, leche u hormonas. Las glándulas se clasifican en dos amplias categorías: *glándulas exocrinas* y *glándulas endocrinas*. Las **glándulas exocrinas** secretan sustancias en una cavidad corporal o sobre

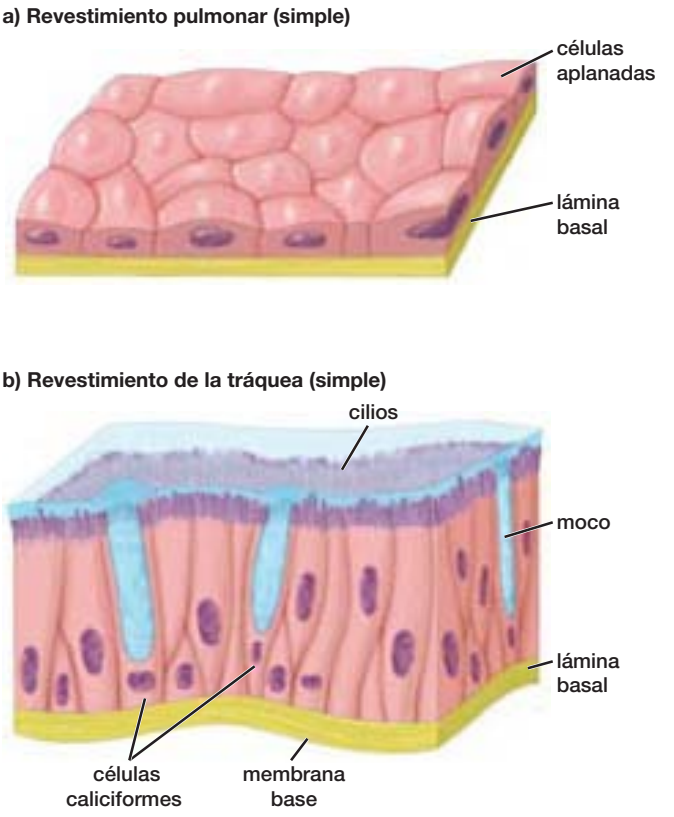


FIGURA 31-4 Ejemplos de tejido epitelial
a) Células delgadas y aplanadas en una capa única forman el tejido epitelial que reviste los pulmones, donde es esencial el intercambio de gases por difusión. ***b)*** Células epiteliales alargadas y ciliadas se intercalan con células caliciformes que secretan mucosidad y que revisten la tráquea. ***c)*** La epidermis consiste en múltiples capas de tejido epitelial estratificado cubierto por una capa protectora de células muertas. Todo el tejido epitelial incluye una capa delgada de proteína fibrosa, llamada lámina basal, situada debajo de las células epiteliales.

la superficie del cuerpo, a menudo a través de un tubo angosto o *ducto*. Como ejemplos podemos citar las glándulas sudoríparas y *sebáceas* (secretoras de aceites); ambos tipos se encuentran en la piel y se derivan del epitelio (véase la figura 31-11). Las *glándulas salivales* secretan saliva a la boca; otras glándulas exocrinas vierten enzimas digestivas en el estómago y en el intestino delgado. Las **glándulas endocrinas** carecen de ductos; secretan *hormonas* que se difunden en los capilares cercanos. Las **hormonas** son sustancias químicas producidas en pequeñas cantidades y que se transportan por medio del torrente sanguíneo para regular la actividad de las células

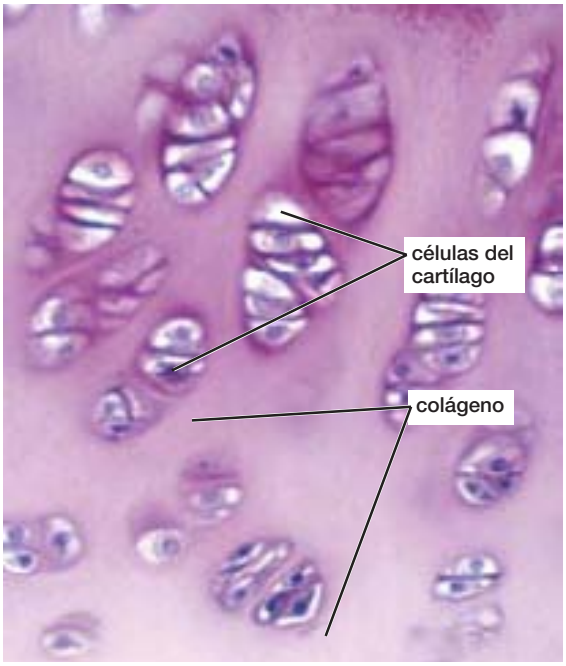


FIGURA 31-5 Cartílago
Las células del cartílago, teñidas de color púrpura oscuro, se encuentran rodeadas de espacios transparentes. El material homogéneo teñido de color púrpura pálido es la matriz del colágeno secretado por las células cartilaginosas.

(a menudo distantes). Las glándulas endocrinas y sus hormonas se explican con más detalle en el capítulo 37.

Los tejidos conectivos tienen diversas estructuras y funciones

Los **tejidos conectivos** sirven principalmente para sostener y unir otros tejidos. La mayor parte de los tejidos conectivos consisten en células incrustadas en una *matriz* de sustancias extracelulares. Esta matriz no celular de tejido conectivo comúnmente incluye líquido y varios tipos de fibras proteínicas flexibles, la más abundante de las cuales es el **colágeno**. Estas proteínas por lo común son secretadas por las células del tejido conectivo. Los tejidos conectivos se agrupan en tres categorías principales.

Tejido conectivo laxo
Ésta es la forma más abundante y consiste en un líquido espeso que contiene células dispersas que secretan fibras proteínicas y colágeno. Este tejido flexible conecta, sostiene y rodea otros tipos de tejidos y forma un marco de sostén interno para órganos como el hígado. El tejido conectivo laxo se combina con el tejido epitelial para formar *membranas*. Por ejemplo, la *piel* (tejido epitelial estratificado soportado por tejido conectivo laxo) es una membrana que cubre la totalidad de la superficie corporal externa, y las *membranas mucosas* (tejido epitelial simple ciliado soportado por tejido conectivo laxo) recubren las cavidades internas del sistema digestivo, reproductor, respiratorio y urinario.

Tejido conectivo fibroso
Este grupo incluye los **tendones** (que conectan los músculos con los huesos) y **ligamentos** (que conectan unos huesos con otros). El tejido conectivo fibroso contiene fibras de colágeno, las cuales forman un empaque denso en un arreglo orde-

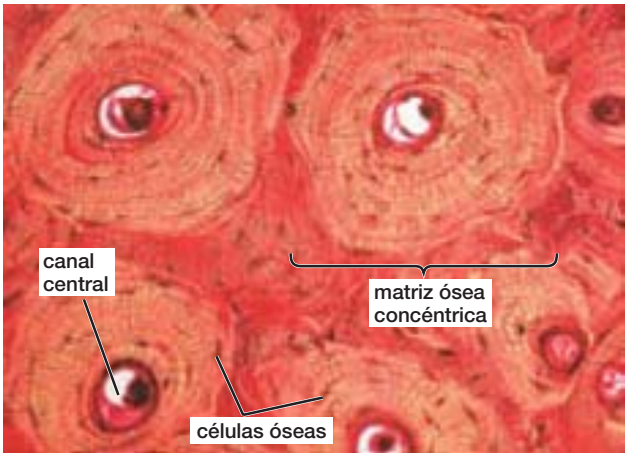


FIGURA 31-6 Hueso
En esta micrografía se observan con claridad los círculos concéntricos de hueso (un tejido conectivo especializado), depositados alrededor de un canal central que contiene un vaso sanguíneo. Las células óseas individuales aparecen como manchas oscuras atrapadas en pequeñas cámaras dentro de la matriz dura que las mismas células depositan.

nadamente paralelo, un diseño que imparte flexibilidad y una gran fuerza a los tendones y ligamentos.

Tejidos conectivos especializados

Este grupo diverso incluye *cartílagos*, *huesos*, *grasa*, *sangre* y *linfa*. El **cartílago** es flexible y resistente; consiste en células ampliamente espaciadas rodeadas de una matriz gruesa e inerte. Esta matriz está compuesta por el colágeno secretado de las células cartilaginosas (FIGURA 31-5). El cartílago cubre los extremos de los huesos en las articulaciones, constituye el armazón de sostén de las vías respiratorias, brinda soporte a las orejas y la nariz, y forma cojincillos amortiguadores entre las vértebras. El **hueso** (FIGURA 31-6) se parece al cartílago, pero su matriz se ha endurecido por depósitos de fosfato de calcio. El hueso se forma en círculos concéntricos alrededor de un canal central, que contiene un vaso sanguíneo. (Estudiaremos a fondo los cartílagos y los huesos en el capítulo 39). Las células grasas, llamadas colectivamente **tejido adiposo** (FIGURA 31-7a), están modificadas para el almacenamiento de energía a largo plazo. El tejido adiposo tiene especial importancia en la fisiología de los animales adaptados a entornos fríos, pues, además de almacenar energía, también sirve como aislante (FIGURA 31-7b). La **sangre** y la **linfa**, aunque son líquidos, se consideran tejidos conectivos especializados porque se componen principalmente de líquidos extracelulares en los que las células individuales están suspendidas. La porción celular de la sangre (FIGURA 31-8) consiste en glóbulos rojos o eritrocitos (que transportan el oxígeno), glóbulos blancos o leucocitos (que combaten las infecciones) y fragmentos de células llamados *plaquetas* (que participan en el proceso de coagulación de la sangre). Todos ellos están embebidos en un líquido extracelular llamado *plasma*. La linfa consiste principalmente en líquido que se filtra de los capilares de la sangre (los vasos sanguíneos más pequeños) y regresa al sistema circulatorio por medio de vasos linfáticos. Aprenderás más acerca de la sangre y la linfa en el capítulo 32.

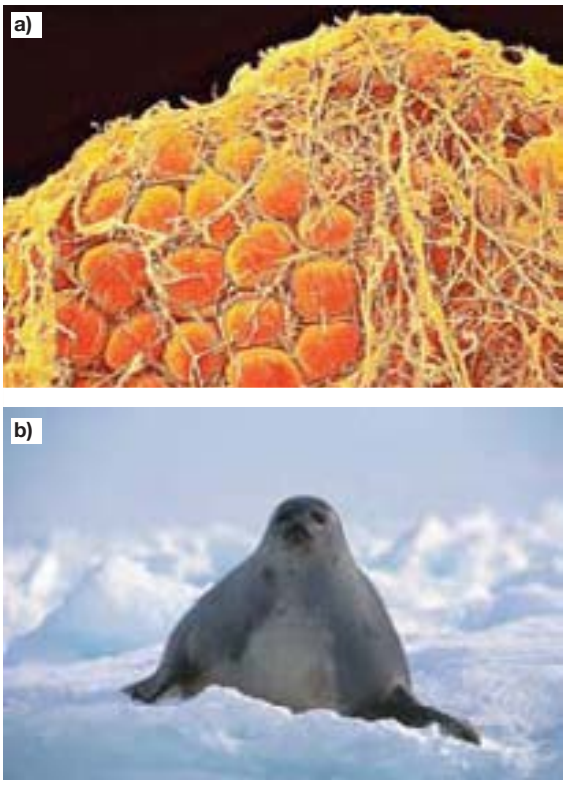


FIGURA 31-7 Tejido adiposo
a) El tejido adiposo del abdomen del cuerpo humano, que se muestra aquí, es tejido conectivo especializado compuesto casi exclusivamente de células grasas. Una gotita de aceite ocupa casi la mayor parte del volumen de la célula. El tejido conectivo fibroso amarillo cubre las células. ***b***) Una foca de capucha a los cuatro días de nacida ya ha duplicado su peso tomando la leche de la madre que contiene 61 por ciento de grasa, obtenida de la provisión de grasa que la madre almacena. Con un peso de 45 kilos, la cría está demasiado gorda para moverse. La grasa la alimentará y aislará cuando los témpanos de hielo se desintegren y se zambulla en las heladas aguas para cazar y alimentarse por su cuenta. PREGUNTA: ¿Por qué los mamíferos jóvenes a menudo son más gordos que los adultos?

El tejido muscular puede contraerse

Las largas y delgadas células del tejido muscular se contraen (es decir, se acortan) cuando reciben un estímulo y luego se relajan pasivamente. Hay tres tipos de tejido muscular: esquelético, cardiaco y liso. El **músculo esquelético** (FIGURA 31-9) generalmente está bajo control voluntario *o consciente*. Como su nombre implica, su principal función es mover el esqueleto, como cuando caminamos o damos vuelta a las páginas de este texto. El **músculo cardiaco** se localiza únicamente en el corazón. A diferencia de los músculos esqueléticos, actúa espontánea e involuntariamente, ya que no está bajo control consciente. Las células musculares cardiacas están conectadas mediante uniones abiertas a través de las cuales las señales eléctricas se difunden rápidamente por el corazón; de esta forma, las células musculares cardiacas se estimulan y se contraen de manera coordinada. El **músculo liso**, llamado así porque no tiene la disposición ordenada de filamentos gruesos y delgados que se observa en los músculos esqueléticos y del

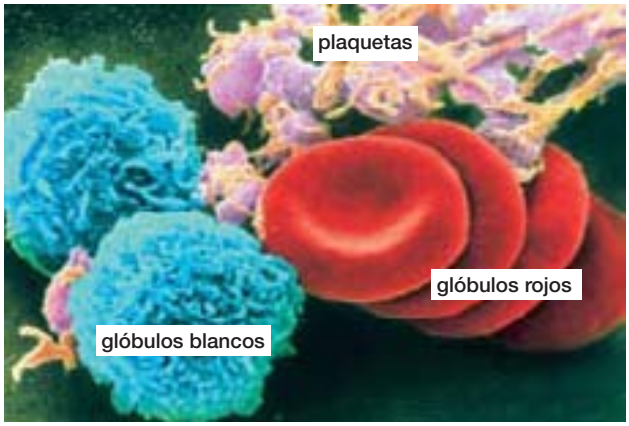


FIGURA 31-8 Glóbulos de la sangre
La sangre contiene tres tipos de componentes celulares, que se muestran en esta micrografía electrónica realzada a color. Las células se encuentran suspendidas en plasma, que también es un componente de este tejido conectivo especializado. PREGUNTA: ¿Por qué se considera a la sangre como una forma de tejido conectivo?

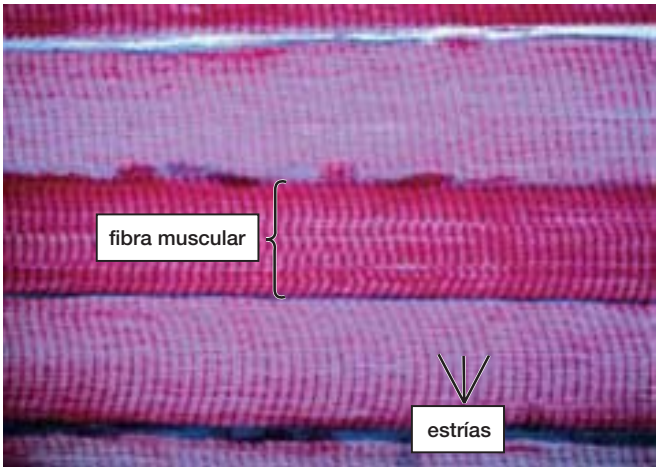


FIGURA 31-9 El tejido muscular consiste en células contráctiles llamadas fibras musculares
La disposición regular de proteínas fibrosas dentro de las células musculares (llamadas fibras musculares) del músculo esquelético hace que este tejido, visto al microscopio, presente franjas o "estrías".

corazón, está embebido en las paredes del tracto digestivo, el útero, la vejiga y los vasos sanguíneos grandes. Los músculos lisos producen contracciones lentas y sostenidas que normalmente son involuntarias. Nos ocuparemos de los músculos y su mecanismo de contracción en el capítulo 39.

El tejido nervioso se especializa en transmitir señales eléctricas

Podemos percibir y responder al mundo gracias al **tejido nervioso** que compone el cerebro, la médula espinal y los nervios que salen de ellos hacia todo el cuerpo. El tejido nervioso se compone de dos tipos de células: células nerviosas, también llamadas **neuronas** y células gliales. Las neuronas se especializan en la generación de señales eléctricas y en conducir éstas a otras neuronas, o bien, a los músculos o las glándulas (**FIGURA 31-10**). Las **células gliales** rodean, sostienen, aíslan eléctricamente y protegen a las neuronas. También regulan la composición del líquido intersticial del sistema nervioso, lo que permite a las neuronas funcionar de forma óptima. Explicaremos el tejido nervioso en el capítulo 38.

Los órganos incluyen dos o más tipos de tejidos que interactúan

Los órganos están formados de cuando menos dos tipos de tejido que funcionan juntos. Si un órgano es hueco, como la vejiga o los vasos sanguíneos, su interior está revestido de una membrana que consiste en tejido epitelial sostenido por tejido conectivo. Los distintos órganos tienen tipos y proporciones diferentes de tejidos conectivo, glandular, muscular y nervioso. La mayor parte de los órganos funcionan como parte de los sistemas de órganos, los cuales se explicarán en otros capítulos de esta unidad. En el siguiente apartado describiremos la piel (la cual no es parte de un sistema de órganos) como órgano representativo que incluye los cuatro tipos de tejidos.

La piel ilustra las propiedades de un órgano

En un sentido general, la estructura de la piel es representativa de muchos órganos. La capa exterior del tejido epitelial descansa sobre tejido conectivo que contiene un suministro de sangre, nervios, en algunos casos músculos y estructuras glandulares derivadas del epitelio. Aunque en ocasiones pasamos por alto la importancia de nuestra piel, ésta es de tal manera esencial como barrera contra infecciones y contra la pérdida de agua, que una destrucción a gran escala de la piel, por ejemplo, por quemaduras extensas, a menudo es mortal. La piel también ayuda a mantener la homeostasis al disipar o conservar el calor corporal, y servir como barrera contra los organismos patógenos.

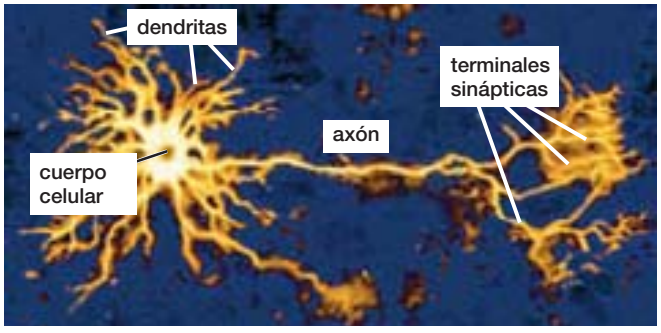


FIGURA 31-10 Tejido nervioso
Las células nerviosas se especializan en recibir y transmitir señales. Esta micrografía muestra una neurona humana que estimula la contracción de las células musculares. Las dendritas se especializan en recibir las señales de otras neuronas, el axón porta la señal de salida de la neurona al músculo, y las terminales sinápticas transmiten la señal a las células musculares.

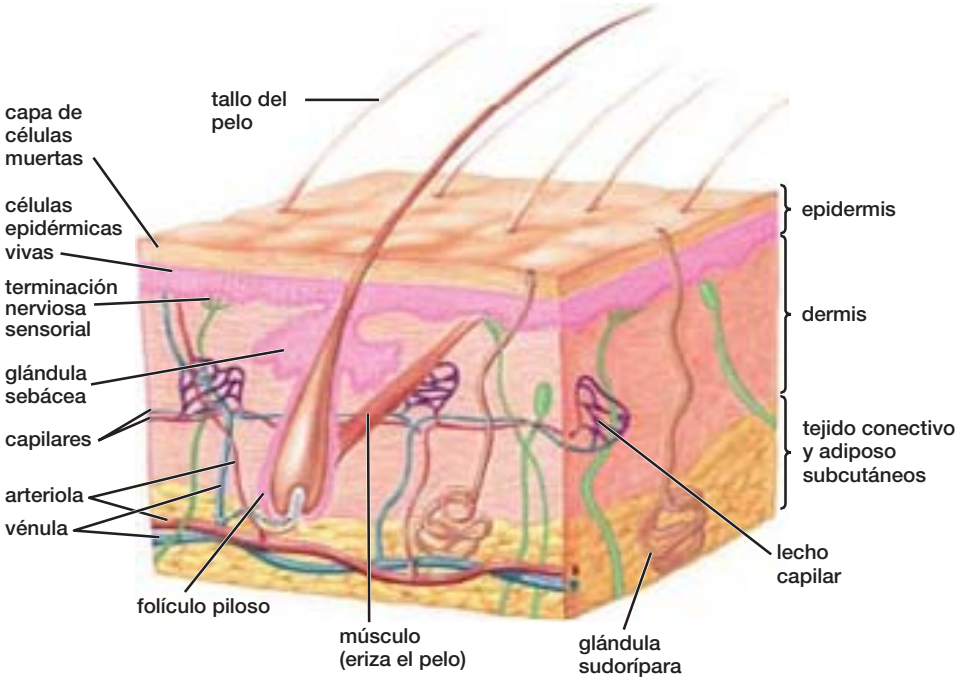


FIGURA 31-11 La piel es un órgano Corte transversal de la piel de un mamífero, como órgano representativo. La piel es una membrana que contiene glándulas, músculos y células nerviosas. PREGUNTA: ¿Por qué la piel se considera como un órgano y la sangre como un tejido?

La **epidermis**, o capa externa de la piel, es un conjunto especializado de capas de tejido epitelial (estratificado) (FIGURA 31-11). Está recubierta por una capa protectora de células muertas producidas por las células vivas epidérmicas subyacentes. Estas células muertas forman un paquete con queratina proteínica, lo cual ayuda a que la piel sea elástica, resistente y relativamente impermeable.

Inmediatamente debajo de la epidermis hay una capa de tejido conectivo laxo, la **dermis**. Las células poco apretadas de la dermis son penetradas por *arteriolas* (pequeñas arterias), las cuales se alimentan de sangre bombeada desde el corazón a una densa malla de capilares que nutren el tejido tanto dérmico como epidérmico y desembocan en una red de *vénulas* (pequeñas venas) en la dermis. La pérdida de calor a través de la piel se regula con gran precisión mediante neuronas que controlan el grado de dilatación (expansión) de las arteriolas. Cuando se requiere enfriamiento, las arteriolas se dilatan e inundan los lechos capilares con sangre, lo que libera el exceso de calor. Cuando es preciso conservar el calor, las arteriolas que abastecen a los capilares de la piel se constriñen; por eso, los médicos que atendieron a Erika, observaron que ciertas partes de la piel de las manos de la niña se habían "quemado" por el frío. Los vasos linfáticos recogen y desechan el líquido extracelular que está dentro de la dermis. Varias terminaciones nerviosas sensoriales, que responden a la temperatura, el tacto, la presión, la vibración y el dolor, están diseminadas por toda la dermis y epidermis, con el fin de dar información al sistema nervioso.

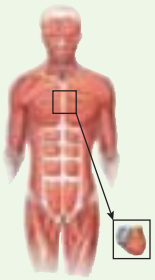
La dermis también incluye glándulas derivadas del tejido epitelial. Las glándulas llamadas **folículos pilosos** producen pelo a partir de secreciones proteínicas. Las glándulas sudoríparas producen secreciones acuosas que enfrían la piel y excretan sustancias como sal y urea. Las *glándulas sebáceas* secretan una sustancia aceitosa (el *sebo*) que lubrica el epitelio.

Además de los tejidos epitelial, conectivo y nervioso ya mencionados, la piel contiene también tejido muscular. Diminutos músculos sujetos a los folículos pilosos pueden hacer que los vellos de la piel "se ericen", respondiendo a señales de neuronas motrices. Casi todos los mamíferos pueden aumentar el espesor de su pelaje aislante erizando pelos individuales cuando hace frío, pero esta reacción resulta inútil para retener el calor en los seres humanos, quienes simplemente experimentan la "carne de gallina" cuando estos pequeños músculos se contraen.

Los sistemas de órganos consisten en dos o más órganos que interactúan

Los sistemas de órganos consisten en dos o más órganos individuales (a veces situados en diferentes regiones del cuerpo) que colaboran en el desempeño de una función común. Un ejemplo es el sistema digestivo, en el que la boca, el esófago, el estómago, los intestinos y otros órganos (como el hígado y el páncreas) que aportan secreciones digestivas colaboran para convertir los alimentos en moléculas de nutrimentos (véase la figura 31-3). Los principales sistemas de órganos del cuerpo de los vertebrados y sus órganos representativos y funciones se presentan en la tabla 31-1.

Tabla 31-1 Principales sistemas de órganos de los vertebrados

Sistema de órganos	Principales estructuras	Papel fisiológico	Sistema de órganos	Principales estructuras	Papel fisiológico
Sistema circulatorio	Corazón, vasos sanguíneos, sangre	Transporta nutrimentos, gases, hormonas, desechos metabólicos; también ayuda a controlar la temperatura	Sistema endocrino	Diversas glándulas y órganos que secretan hormonas como el hipotálamo, la hipófisis o pituitaria, la tiroides, el páncreas, las suprarrenales, los ovarios y los testículos	Controla procesos fisiológicos, por lo regular junto con el sistema nervioso
Sistema linfático/ inmunitario	Linfa, nodos y vasos linfáticos, glóbulos blancos	Lleva grasa y líquidos en exceso a la sangre; destruye microbios invasores	Sistema nervioso	Cerebro, médula espinal, nervios periféricos	Controla procesos fisiológicos junto con el sistema endocrino; detecta el medio y dirige el comportamiento
Sistema digestivo	Boca, esófago, estómago, intestinos delgado y grueso, glándulas que producen secreciones digestivas	Abastece al cuerpo de nutrimentos que proporcionan energía y materiales para el crecimiento y el mantenimiento	Sistema muscular 	Músculo esquelético Músculo liso Músculo cardiaco	Mueve el esqueleto Controla el movimiento de sustancias a través de órganos huecos (tracto digestivo, grandes vasos sanguíneos) Inicia y efectúa las contracciones cardiacas
Sistema urinario	Riñones, uréteres, vejiga, uretra	Mantiene condiciones homeostáticas dentro del torrente sanguíneo; filtra desechos celulares, ciertas toxinas y el exceso de agua y nutrimentos	Sistema esquelético	Huesos, cartílago, tendones, ligamentos	Brinda sostén al cuerpo, sitios de sujeción para los músculos y protección para los órganos internos
Sistema respiratorio	Nariz, tráquea, pulmones (mamíferos, aves, reptiles, anfibios), agallas (peces y algunos anfibios)	Proporciona un área para el intercambio de gases entre la sangre y el medio; permite la obtención de oxígeno y la eliminación de dióxido de carbono	Sistema reproductor	Macho: testículos, vesículas seminales, próstata, pene Hembra: ovarios, oviductos, útero, vagina, glándulas mamarias	Macho: produce espermatozoides, fecunda a la hembra Hembra: produce óvulos, nutre al embrión en desarrollo

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿LA VIDA SUSPENDIDA?

Los animales, para mantenerse vivos, requieren de una dotación constante de ATP, lo que a su vez necesita un suministro constante de oxígeno. El frío retarda todas las reacciones bioquímicas; las tasas metabólicas (es decir, la rapidez con la que las células producen y utilizan la energía) tanto de Erika como de Anna y, por consiguiente, su necesidad de oxígeno, se redujeron radicalmente por las bajas temperaturas corporales. Mientras que el cerebro sufre un daño permanente después de cerca de cinco minutos sin oxígeno a una temperatura corporal normal, los cerebros de Erika y Anna no sufrieron ningún daño porque sobrevivieron más tiempo en un frío extremo. Los médicos, de forma rutinaria, aprovechan este hecho durante una cirugía de corazón abierto, al bajar la temperatura corporal del paciente de su lectura normal de 37°C a cerca de 18°C durante unos 45 minutos en que deja de latir el corazón. Los estudios realizados en animales sugieren que aun un enfriamiento más intenso (como el que experimentaron Erika y Anna) prolonga el tiempo en que una persona puede permanecer sin peligro en un estado de animación suspendida.

En el Hospital General de Massachusets el cirujano traumatólogo Hasan Alam realiza experimentos con cerdos; les extrae toda la sangre y la remplaza con una disolución fría que contiene nutrimentos. En este estado, con sus cuerpos enfriados a 10°C, los cerdos no tienen latidos cardiacos, no respiran y el cerebro no presenta actividad eléctrica. Tan pronto como se bombea la sangre caliente al cuerpo del animal, aun después de dos horas y media en tales condiciones, su corazón vuelve a latir y el animal revive. Las pruebas de comportamiento realizadas sugieren que los cerdos no experimentan un daño duradero. Es posible que en un futuro cercano se realicen ensayos clínicos utilizando este procedimiento en las víctimas de traumas que se encuentren a punto de morir a causa de una intensa pérdida de sangre. Al remplazar la sangre que queda en la víctima con una disolución de nutrimentos cerca del punto de congelamiento, los médicos tienen la esperanza de que entonces podrán disponer de un tiempo valioso para operar y reparar el daño antes de reanimar al paciente con sangre caliente.

Piensa en esto Los pacientes que están a punto de morir como resultado de intensas hemorragias no están en condiciones de dar su consentimiento para que les apliquen un procedimiento experimental. Por esta razón, el doctor Alam está trabajando para informar a toda la comunidad que atiende su hospital acerca del remplazo experimental de sangre, y por ello está animando a quienes no desean participar a que lleven un brazalete que indique su decisión. Describe algunas de las ventajas y problemas potenciales de esta forma de obtener "voluntarios" para las pruebas clínicas.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

31.1 Homeostasis: ¿Cómo regulan los animales su ambiente interno?

La homeostasis se refiere al equilibrio dinámico dentro del cuerpo animal por medio del cual las condiciones fisiológicas, que incluyen los niveles de temperatura, sal, oxígeno, glucosa, pH y agua, se mantienen dentro de un intervalo en el que las proteínas pueden funcionar y se dispone de energía. Los animales difieren en cuanto a la regulación de la temperatura. Los ectotérmicos obtienen la mayor parte de su calor corporal del medio y tienden a tolerar temperaturas corporales extremas. Los endotérmicos obtienen la mayor parte de su calor de las actividades metabólicas y tienden a regular su temperatura corporal dentro de un intervalo estrecho.

Las condiciones homeostáticas se mantienen a través de la retroalimentación negativa, en la cual un cambio activa una respuesta que lo contrarresta y restaura las condiciones del punto de referencia. Hay pocos casos de retroalimentación positiva, en los cuales un cambio inicia sucesos que lo intensifican (como las contracciones uterinas que conducen al nacimiento de un bebé), pero estas situaciones son todas autolimitantes a través de la retroalimentación negativa. Dentro del cuerpo animal, los mecanismos de retroalimentación múltiple trabajan al unísono.

Web tutorial 31.1 Homeostasis

31.2 ¿Cómo está organizado el cuerpo animal?

El cuerpo animal se compone de sistemas que constan de dos o más órganos; éstos, a la vez, se componen de tejidos. Un tejido es un conjunto de células y de material extracelular que forman una unidad estructural y funcional y se especializan para realizar una tarea específica. Los tejidos animales incluyen los epiteliales, conectivos, musculares y nerviosos.

El tejido epitelial forma cubiertas membranosas para las superficies externas e internas del cuerpo y también da origen a las glándulas. El tejido conectivo normalmente contiene una buena cantidad de material extracelular, llamada matriz, e incluye dermis, huesos, tendones, ligamentos, cartílagos, tejido adiposo y sangre. El tejido muscular se especializa en producir movimiento mediante contracciones. Hay tres tipos de tejido muscular: esquelético, cardiaco y liso. El tejido nervioso, que incluye neuronas y células gliales, se especializa en generar y conducir señales eléctricas.

Los órganos incluyen al menos dos tipos de tejidos que operan juntos. La piel de los mamíferos es un órgano representativo. La epidermis, un tejido epitelial, cubre la dermis; esta última contiene vasos sanguíneos y linfáticos, glándulas sudoríparas y sebáceas, así como diminutos músculos erectores del pelo. Entre los sistemas de órganos de los animales están el sistema digestivo, urinario, inmunitario, respiratorio, circulatorio/linfático, nervioso, muscular, esquelético, endocrino y reproductor, que se resumen en la tabla 31-1.

TÉRMINOS CLAVE

cartílago *pág. 642*
célula glial *pág. 643*
colágeno *pág. 641*
dermis *pág. 644*
ectotérmico *pág. 636*
endotérmico *pág. 636*
epidermis *pág. 644*
folículo piloso *pág. 644*
glándula *pág. 640*
glándula endocrina *pág. 641*
glándula exocrina *pág. 640*
homeostasis *pág. 636*
hormona *pág. 641*
hueso *pág. 642*
ligamento *pág. 641*
linfa *pág. 642*
músculo cardiaco *pág. 642*
músculo esquelético *pág. 642*
músculo liso *pág. 642*
neurona *pág. 643*
órgano *pág. 639*
retroalimentación negativa *pág. 638*
retroalimentación positiva *pág. 639*
sangre *pág. 642*
sistema *pág. 639*
tejido *pág. 639*
tejido adiposo *pág. 642*
tejido conectivo *pág. 641*
tejido epitelial *pág. 639*
tejido nervioso *pág. 643*
tendón *pág. 641*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Define y compara a los animales *ectotérmicos* y *endotérmicos*. Da un ejemplo de cada uno. ¿Los términos "de sangre fría" y "de sangre caliente" son formas precisas de describirlos? Explica por qué.
2. Define *homeostasis* y explica cómo la retroalimentación negativa ayuda a mantenerla. Explica un ejemplo de homeostasis en el cuerpo humano.
3. Explica la retroalimentación positiva y da un ejemplo fisiológico. Explica por qué este tipo de retroalimentación es relativamente raro en los procesos fisiológicos.
4. Explica lo que sucede en tu organismo para restablecer la temperatura de homeostasis cuando te sobrecalientas al hacer ejercicio en un día caluroso y húmedo.
5. Describe la estructura y las funciones del tejido epitelial.
6. ¿Qué propiedad distingue el tejido conectivo de otros tipos de tejido? Lista tres tipos generales de tejido conectivo y describe brevemente la función de cada uno.
7. Describe la piel, como un órgano representativo. Incluye los diversos tejidos que la componen y describe brevemente el papel que desempeña cada tejido.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. ¿Por qué la vida terrestre presenta más dificultades para mantener la homeostasis que la acuática?
2. En respuesta al frío, explica cómo el comportamiento y los mecanismos inconscientes trabajan juntos para mantener la homeostasis térmica.
3. Las quemaduras de tercer grado suelen ser indoloras. La piel sólo se regenera a partir de los bordes de estas quemaduras. Las quemaduras de segundo grado se regeneran a partir de células situadas en los bordes de la quemadura, en los folículos pilosos y en las glándulas sudoríparas. Las quemaduras de primer grado son dolorosas, pero sanan rápidamente a partir de las células epidérmicas no dañadas. A partir de esta información, indica la profundidad de las quemaduras de primero, segundo y tercer grados en la figura 31-11.
4. Imagina que eres un profesional médico que imparte un curso prenatal para padres. Describe una analogía del mundo real con sensores, corrientes eléctricas, motores y demás para ilustrar las relaciones de retroalimentación que intervienen en la iniciación del parto, en términos comprensibles para una persona ordinaria.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Bruemmer, F. "Five Days with Fat Hoods". *International Wildlife*, enero-febrero de 1999. El crecimiento tan rápido y la prodigiosa capacidad para almacenar grasa de la foca de capucha le permiten adaptarse con el fin de mantener la homeostasis en las condiciones extremas de las regiones cercanas al Polo Norte.

Nuland, S. *The Wisdom of the Body.* Nueva York: Alfred A. Knopf, 1997. La fisiología humana vista a través de los ojos de un cirujano. Un relato de primera mano de la belleza y fuerza de los mecanismos del organismo para mantener la homeostasis.

Roth, M. B. y Nystul, T. "Buying Time in Suspended Animation". *Scientific American*, junio de 2005. Este artículo escrito en forma atractiva explica cómo los estudios en animales sugieren que el estado de animación suspendida puede ayudar en el futuro a ganar tiempo para los órganos que han sido donados o para las víctimas de traumas.

Storey, K. B. y Storey, J. M. "Frozen and Alive". *Scientific American*, diciembre de 1990. Algunos animales tienen adaptaciones especiales que les permiten soportar el congelamiento.

Trivedi, Bijal. "Life on Hold". *New Scientist*, 21 de enero de 2006. Revisa la evidencia de los estudios en animales que sugiere que, por medio del frío o de sustancias químicas, los órganos o los cuerpos humanos dañados pueden ganar un tiempo valiosísimo al ser sometidos a un estado de animación suspendida.

CAPÍTULO

32 Circulación

Los compañeros de equipo de Darryl Kile lo observan lanzar la bola en un memorable servicio. (Imagen en recuadro) Una placa en esta arteria coronaria (una arteria que suministra sangre al corazón) estimuló la formación de un coágulo sanguíneo que obstruye por completo el conducto y evita que la sangre llegue a una parte del músculo cardiaco. Esta obstrucción provocará un ataque al corazón.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Muerte súbita

32.1 ¿Qué características y funciones principales tienen los sistemas circulatorios?

Los animales tienen dos tipos de sistemas circulatorios

El sistema circulatorio de los vertebrados tiene muy diversas funciones

32.2 ¿Cómo funciona el corazón de los vertebrados?

Durante la evolución de los vertebrados han surgido corazones cada vez más complejos y eficientes

El corazón de los vertebrados consta de dos cavidades musculares que forman dos bombas individuales

Guardián de la salud: Al rescate de los corazones enfermos

32.3 ¿Qué es la sangre?

El plasma es primordialmente agua en la que se disuelven proteínas, sales, nutrimentos y desechos

Los glóbulos rojos llevan oxígeno de los pulmones a los tejidos

Los glóbulos blancos ayudan a defender al cuerpo contra las enfermedades

Las plaquetas son fragmentos celulares que ayudan a coagular la sangre

32.4 ¿Qué tipos de vasos sanguíneos hay y qué funciones tienen?

Las arterias y arteriolas son vasos de paredes gruesas que transportan sangre desde el corazón

Los capilares son vasos microscópicos que permiten el intercambio de nutrimentos y desechos entre la sangre y las células del cuerpo

Las venas y vénulas llevan sangre de regreso al corazón

Las arteriolas controlan la distribución del flujo sanguíneo

32.5 ¿Cómo colabora el sistema linfático con el circulatorio?

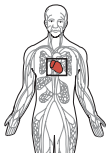
Los vasos linfáticos se parecen a las venas y capilares del sistema circulatorio

El sistema linfático devuelve líquidos a la sangre

El sistema linfático transporta grasas del intestino delgado a la sangre

El sistema linfático ayuda a defender al cuerpo contra las enfermedades

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Muerte súbita



ESTUDIO DE CASO MUERTE SÚBITA

EL 22 DE JUNIO DE 2002 los Cardenales de San Louis se preparaban para el partido contra los Cachorros de Chicago. Conforme se aproximaba la hora del juego, todos ellos se sintieron intrigados, y luego preocupados, ante la inexplicable ausencia del pitcher, Darryl Kile. Su preocupación se convirtió en conmoción y aflicción cuando Kile, de 33 años, fue hallado muerto en la habitación de su hotel; al parecer, falleció durante el sueño. Reconocido como uno de los mejores pitchers del país y notable por sus excepcionales lanzamientos curvos, Kile era un deportista en la cúspide de su carrera. Pero la autopsia reveló que dos de sus tres arterias coronarias (las cuales suministran sangre al músculo cardiaco) estaban obstruidas entre el 80 y 90 por ciento por aterosclerosis, una afección en la que el calibre de las arterias se reduce por la acumulación de depósitos de grasa que se conocen como placa (véase la imagen en el recuadro de la página anterior). El corazón de Kile también mostraba un tamaño mayor de lo normal, un resultado de sus heroicos intentos por forzar la circulación de la sangre por las arterias parcialmente obstruidas. Algunos rasgos genéticos heredados favorecen la formación de placa y pueden provocar niveles de acumulación de colesterol que pongan la vida de una persona en peligro a una edad mucho menor en comparación con quienes no presentan factores de riesgo. El hecho de que el padre de Kile muriera de un ataque al corazón a la edad de 44 años sugiere que Darryl Kile se encontraba en este grupo de riesgo.

La aterosclerosis a menudo comienza en la niñez. Millones de niños en Estados Unidos presentan elevados niveles de colesterol, como consecuencia de dietas altas en grasas y falta de ejercicio; pero por lo general transcurren décadas antes de que la enfermedad se manifieste. ¿Cómo funciona el corazón? ¿Cómo se ve amenazado por la aterosclerosis y la hipertensión? ¿Qué tratamientos habrían podido beneficiar a Darryl Kile si él hubiera estado consciente de su condición?

32.1 ¿QUÉ CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES PRINCIPALES TIENEN LOS SISTEMAS CIRCULATORIOS?

Hace miles de millones de años, el mar en el que evolucionaron las primeras células se encargaba de nutrirlas. El agua aportaba nutrimentos, los cuales se difundían en el interior de las células; el agua también se llevaba los desechos de estas últimas, que salían por difusión. En la actualidad, los microorganismos y algunos animales multicelulares simples siguen dependiendo casi exclusivamente de la difusión para intercambiar nutrimentos y desechos con el ambiente. Las esponjas, por ejemplo, hacen circular agua de mar a través de los poros de su cuerpo para acercar el entorno a cada célula. A medida que evolucionaron animales más grandes y complejos, sus células individuales fueron quedando cada vez más lejos del mundo exterior. Sin embargo, las continuas exigencias celulares requieren que las distancias de difusión sean cortas para que lleguen suficientes nutrimentos a las células y éstas no se envenenen con sus propios desechos. Con la evolución del sistema circulatorio, se creó una especie de "mar interno", cuya función es la misma que desempeñaba el mar con las primeras células. Este mar interno transporta alimento y oxígeno a cada célula y se lleva los desechos que ésta produce.

Todos los sistemas circulatorios tienen tres partes principales:

- La **sangre**, un líquido que actúa como medio de transporte.
- Un sistema de canales, o **vasos sanguíneos**, que conducen la sangre por todo el cuerpo.
- Una bomba, el **corazón**, que mantiene a la sangre en circulación.

Los animales tienen dos tipos de sistemas circulatorios

Los animales tienen uno de dos tipos principales de sistema circulatorio: abierto o cerrado. Los **sistemas circulatorios abiertos** se encuentran en muchos invertebrados, entre ellos los artrópodos —que incluyen a los crustáceos, las arañas y los insectos— y los moluscos, como los caracoles y las almejas. Estos animales tienen uno o más "corazones" simples, una red de vasos sanguíneos y un espacio abierto grande dentro del cuerpo llamado **hemocele** (FIGURA 32-1a). Dentro del hemocele (que podría ocupar del 20 al 40 por ciento del volumen corporal), la sangre baña directamente los tejidos y órganos internos. En los insectos el corazón es una porción modificada del vaso sanguíneo dorsal, que consiste en una serie de cavidades que se contraen. Cuando esto último sucede, las válvulas en el corazón se cierran, lo que obliga a la sangre a salir por los vasos hacia el hemocele. Cuando las cavidades del corazón se relajan, la sangre vuelve a entrar en ellos proveniente del hemocele.

Los **sistemas circulatorios cerrados** también se encuentran en invertebrados como la lombriz de tierra (FIGURA 32-1b) y moluscos muy activos, como los calamares y pulpos, pero son característicos de todos los vertebrados, incluido el ser humano. En los sistemas circulatorios cerrados, la sangre (cuyo volumen representa sólo entre el 5 y 10 por ciento del volumen del cuerpo) está confinada al corazón y a una serie continua de vasos sanguíneos. Estos sistemas permiten un flujo más rápi-

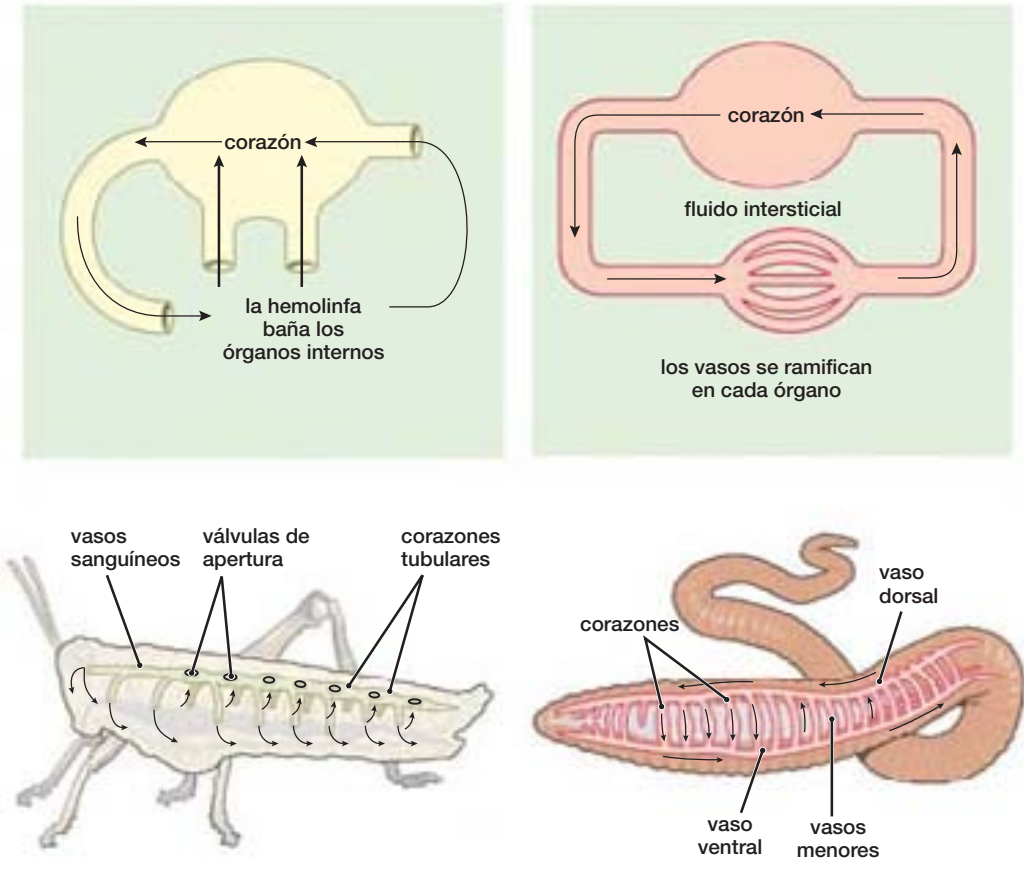


FIGURA 32-1 Sistemas circulatorios abierto y cerrado
(arriba) En el sistema circulatorio abierto de los artrópodos, un corazón bombea sangre a través de vasos hacia el hemocele, donde baña directamente a los demás órganos. (abajo) El saltamontes es un buen ejemplo de un sistema circulatorio abierto (la sangre del insecto carece de hemoglobina y es de una tonalidad verde pálido o casi transparente). ***b)*** (arriba) En un sistema circulatorio cerrado, la sangre queda confinada al corazón (o corazones) y a los vasos sanguíneos. (abajo) En la lombriz de tierra, cinco vasos contráctiles actúan como corazones y bombean sangre a través de vasos ventrales y dorsales principales de los que salen vasos más pequeños. La sangre de la lombriz de tierra, al igual que la nuestra, contiene hemoglobina roja.

do de la sangre, un transporte más eficiente de los desechos y nutrimentos, así como una presión sanguínea más alta que en los sistemas abiertos. En la lombriz de tierra, por ejemplo, cinco vasos contráctiles actúan como corazones: bombean sangre a través de vasos principales de los que salen vasos más pequeños.

El sistema circulatorio de los vertebrados tiene muy diversas funciones

El sistema circulatorio apoya a todos los demás sistemas de órganos del cuerpo. Los sistemas circulatorios de los seres humanos y otros vertebrados desempeñan las siguientes funciones:

- Transportan oxígeno de los pulmones o las branquias a los tejidos y transportan dióxido de carbono de los tejidos a los pulmones o las branquias.
- Distribuyen nutrimentos del aparato digestivo a todas las células del cuerpo.
- Transportan productos de desecho y sustancias tóxicas al hígado (donde se elimina la toxicidad de muchas de ellas) y al riñón para ser excretados.
- Distribuyen hormonas de las glándulas y los órganos que las producen a los tejidos en los que actúan.
- Regulan la temperatura del cuerpo, lo cual se logra en parte ajustando el flujo sanguíneo.
- Evitan la pérdida de sangre mediante el mecanismo de coagulación.
- Protegen al cuerpo contra bacterias y virus gracias a los anticuerpos y glóbulos blancos que circulan en la sangre.

En los siguientes apartados examinaremos las tres partes del sistema circulatorio: el corazón, la sangre y los vasos, haciendo hincapié en el sistema circulatorio de los seres humanos. Por último, describiremos el sistema linfático, que colabora íntimamente con el sistema circulatorio.

32.2 ¿CÓMO FUNCIONA EL CORAZÓN DE LOS VERTEBRADOS?

Durante la evolución de los vertebrados han surgido corazones cada vez más complejos y eficientes

Un sistema circulatorio no podría funcionar adecuadamente sin una bomba confiable. Es preciso desplazar sangre por todo el cuerpo de forma continua durante toda la vida del animal. El corazón de los vertebrados consta de cavidades musculares que pueden contraerse con fuerza. Las cavidades llamadas **aurículas** captan sangre; sus contracciones envían sangre a los **ventrículos**, que son cavidades cuyas contracciones hacen circular la sangre por el cuerpo. A lo largo de la evolución de los vertebrados, el corazón se ha vuelto cada vez más complejo, con más separación entre la sangre oxigenada (que captó oxígeno en los pulmones o las branquias) y la sangre desoxigenada (la cual, al pasar por los tejidos del cuerpo, perdió oxígeno).

El corazón de los peces, los primeros vertebrados que aparecieron, consiste en cavidades contráctiles: una sola aurícula que se comunica con un solo ventrículo (FIGURA 32-2a). La sangre bombeada desde el ventrículo pasa primero por los *capilares*, vasos de paredes delgadas, donde capta oxígeno y libera dióxido de carbono. De ahí, la sangre viaja al resto del cuerpo. A través de los capilares del cuerpo, la sangre suministra oxígeno a los tejidos y recoge dióxido de carbono.

A lo largo del tiempo evolutivo, conforme los peces dieron origen a los anfibios, y éstos a los reptiles, surgió un corazón de tres cavidades: dos aurículas y un ventrículo (FIGURA 32-2b). En los corazones de tres cavidades de los anfibios y la mayoría de los reptiles, la sangre desoxigenada del cuerpo llega a la aurícula derecha, mientras la sangre proveniente de los pulmones llega a la aurícula izquierda. Ambas aurículas vacían su contenido en el único ventrículo. Aunque hay algo de mezcla

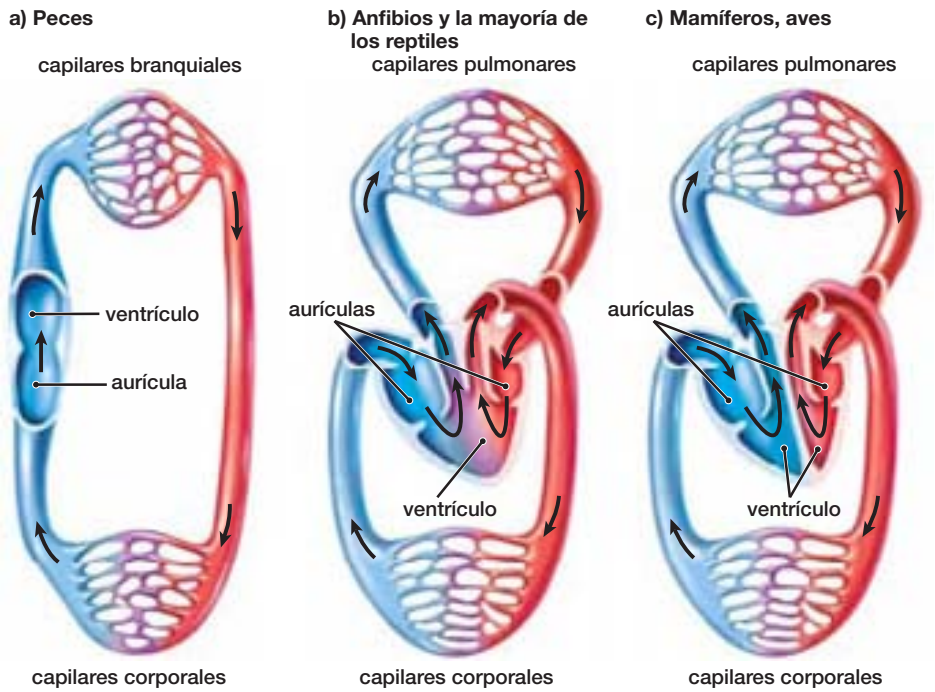


FIGURA 32-2 Evolución del corazón de los vertebrados
a) El corazón más primitivo de los vertebrados está representado por el corazón de dos cavidades de los peces. ***b)*** Los anfibios y casi todos los reptiles tienen un corazón con dos aurículas, de las cuales la sangre pasa a un único ventrículo. Muchos reptiles tienen una pared parcial a la mitad del ventrículo. ***c)*** El corazón de las aves y los mamíferos en realidad consiste en dos bombas individuales que impiden la mezcla de sangre oxigenada y desoxigenada. La sangre oxigenada se ilustra de color rojo, y la desoxigenada, de color azul.

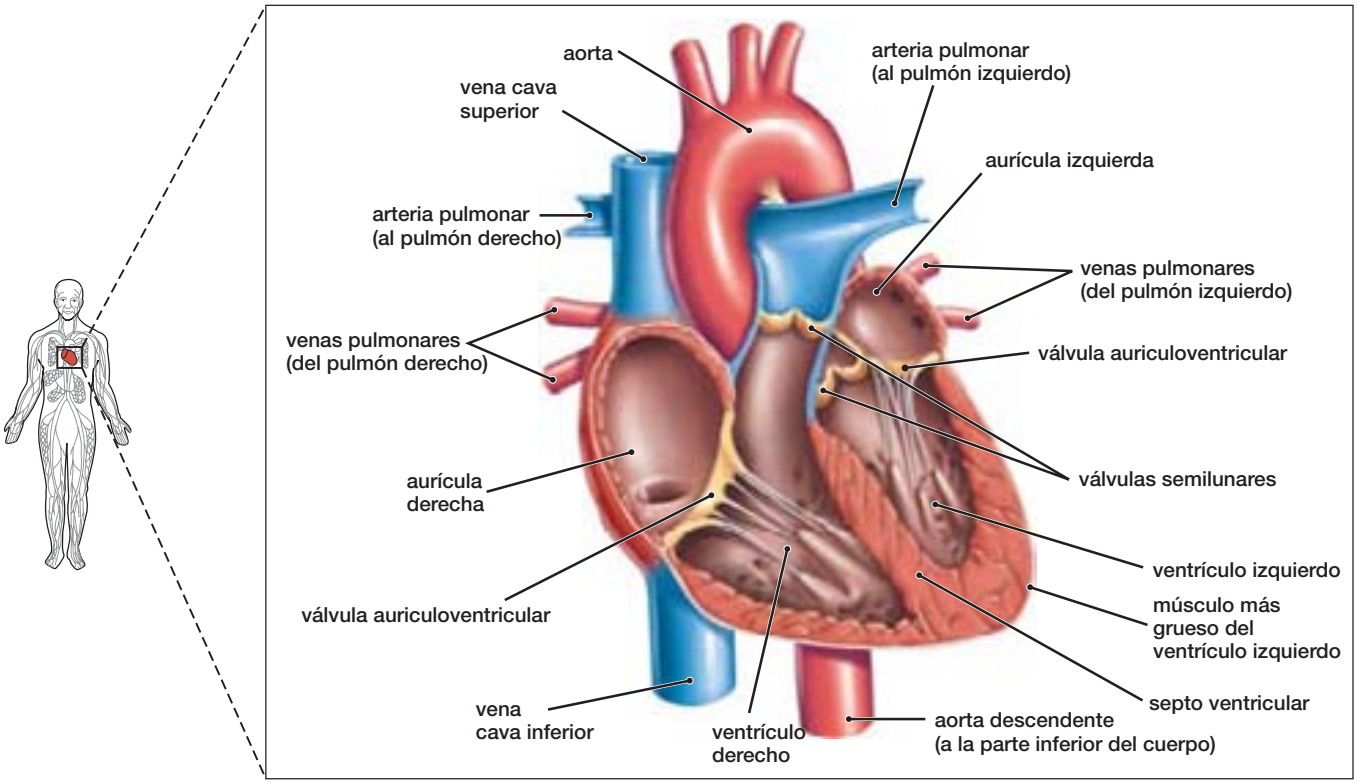


FIGURA 32-3 El corazón humano con sus válvulas y vasos
Este corazón se dibujó como si estuviera en un cuerpo frente al lector, de manera que la derecha y la izquierda aparecen invertidas. Las paredes del ventrículo izquierdo están engrosadas porque deben bombear sangre a todo el cuerpo. Las válvulas semilunares separan la aorta del ventrículo izquierdo, y la arteria pulmonar del ventrículo derecho. Válvulas auriculoventriculares separan las aurículas de los ventrículos.

aquí, la sangre desoxigenada tiende a permanecer en la parte derecha del ventrículo para ser bombeada a los vasos que llegan a los pulmones, mientras que la mayor parte de la sangre oxigenada permanece en la porción izquierda del ventrículo y es bombeada al resto del cuerpo. En los reptiles, la separación es más notable porque hay una pared parcial entre las partes derecha e izquierda del ventrículo. En el corazón de cuatro cavidades de aves y mamíferos (**FIGURA 32-2c**) los ventrículos izquierdo y derecho están separados, lo que impide que la sangre oxigenada y la desoxigenada se mezclen.

El corazón de los vertebrados consta de dos cavidades musculares que forman dos bombas individuales

Las venas transportan la sangre al corazón, y las arterias la extraen

El corazón de las aves y los mamíferos, incluido el ser humano, puede verse como dos bombas individuales, cada una con dos cavidades. En cada bomba, una aurícula recibe y retiene brevemente la sangre, y la pasa a un ventrículo que la impulsa hacia el cuerpo (**FIGURA 32-3**). Una bomba, formada por la aurícula derecha y el ventrículo derecho, bombea sangre desoxigenada. La aurícula derecha recibe del cuerpo sangre sin oxígeno a través de dos grandes **venas**, que son vasos que llevan sangre el corazón: la *vena cava superior* y la *vena cava inferior.* Después de llenarse con sangre, la aurícula derecha se contrae y empuja sangre hacia el ventrículo derecho. La contracción de éste envía la sangre sin oxígeno a los pulmones, a través de las **arterias** pulmonares, que son vasos que llevan sangre proveniente del corazón. La otra bomba, formada por la aurícula y el ventrículo izquierdos, bombea sangre oxigenada. Sangre rica en oxígeno proveniente de los pulmones ingresa en la aurícula izquierda a través de las venas pulmonares y de ahí pasa al ventrículo izquierdo. Las vigorosas contracciones de este ventrículo, que es la cavidad más musculosa del corazón, empujan la sangre oxigenada por una arteria principal, la *aorta,* al resto del cuerpo.

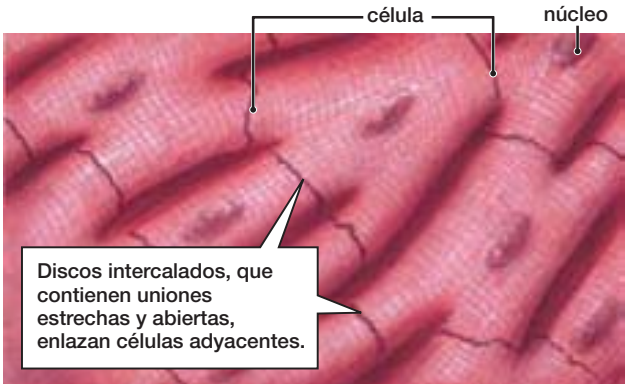


FIGURA 32-4 Estructura del músculo cardiaco
Las células del músculo cardiaco están ramificadas; discos intercalados unen células adyacentes. PREGUNTA: Si un músculo se ejercita continuamente, aumenta su tamaño. ¿Por qué el ritmo cardiaco de un atleta en buena condición es más lento durante el reposo que el ritmo cardiaco de una persona menos activa?

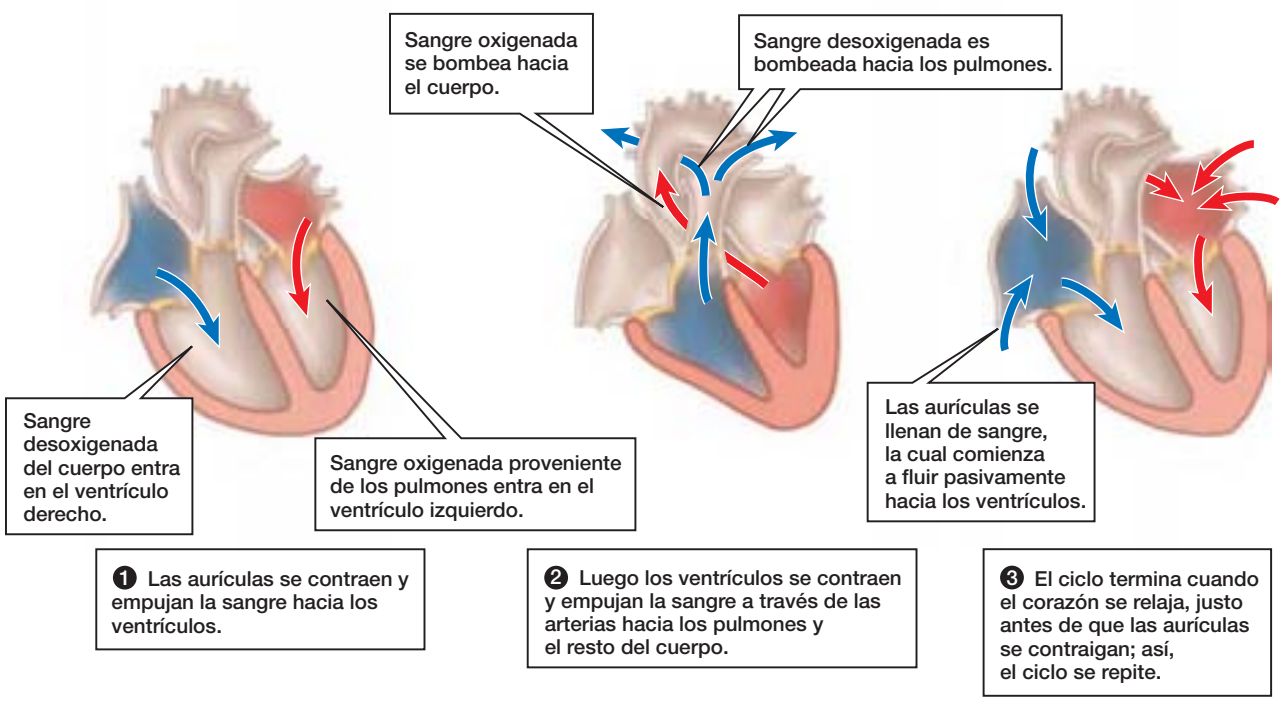

Sangre oxigenada se bombea hacia el cuerpo.
Sangre desoxigenada es bombeada hacia los pulmones.
Sangre desoxigenada del cuerpo entra en el ventrículo derecho.
Sangre oxigenada proveniente de los pulmones entra en el ventrículo izquierdo.
Las aurículas se llenan de sangre, la cual comienza a fluir pasivamente hacia los ventrículos.
❶ Las aurículas se contraen y empujan la sangre hacia los ventrículos.
❷ Luego los ventrículos se contraen y empujan la sangre a través de las arterias hacia los pulmones y el resto del cuerpo.
❸ El ciclo termina cuando el corazón se relaja, justo antes de que las aurículas se contraigan; así, el ciclo se repite.

FIGURA 32-5 El ciclo cardiaco

El músculo cardiaco está presente sólo en el corazón

Cada célula del **músculo cardiaco** es pequeña, ramificada y contiene fibras de proteína que le dan su apariencia de franjas (**FIGURA 32-4**). Las células del músculo cardiaco están unidas entre sí mediante *discos intercalados* que aparecen como bandas entre las células. Los discos intercalados contienen uniones estrechas (*desmosomas*) y uniones abiertas (poros que conectan células adyacentes). Los desmosomas evitan que las fuertes contracciones del corazón separen las células musculares. Las uniones abiertas permiten que la señal eléctrica que desencadena las contracciones pase de manera directa y rápida de una célula muscular a las adyacentes. Esto provoca que regiones interconectadas del músculo cardiaco se contraigan casi de forma sincrónica.

Las contracciones coordinadas de las aurículas y los ventrículos producen el ciclo cardiaco

El corazón humano late unas 100,000 veces al día. Durante cada latido, las dos aurículas se contraen en sincronía para vaciar su contenido a los ventrículos. Una fracción de segundo después, los dos ventrículos se contraen simultáneamente, impulsando la sangre hacia las arterias que salen del corazón. Luego, tanto las aurículas como los ventrículos se relajan brevemente antes de que este **ciclo cardiaco** se repita (**FIGURA 32-5**). Al ritmo cardiaco normal en reposo, el ciclo dura poco menos de un segundo. El ciclo cardiaco está relacionado con la medición de la presión arterial (**FIGURA 32-6**); la *presión sistólica* (la más

FIGURA 32-6 Medición de la presión arterial
Primero, la banda se infla hasta que su presión cierra la arteria principal del brazo; luego se reduce gradualmente la presión. En el momento en que empieza a percibirse el pulso en la arteria con el estetoscopio, las contracciones del ventrículo izquierdo apenas están venciendo la presión de la banda y la sangre comienza a fluir. Esta presión se registra como la lectura más alta: la presión sistólica. Luego se sigue reduciendo la presión de la banda hasta que deja de percibirse el pulso, lo que indica que la sangre está fluyendo continuamente por la arteria. En otras palabras, la presión que prevalece entre las contracciones ventriculares apenas logra vencer la presión de la banda. Ésta es la lectura baja: la presión diastólica. Las cifras se dan en milímetros de mercurio, unidad de presión estándar que también se usa en los barómetros. EJERCICIO: Traza una gráfica que muestre cómo cambia la presión sanguínea dentro de una arteria durante el ciclo cardiaco. En la gráfica, señala los puntos que corresponden a la presión sanguínea sistólica y diastólica, medidas por la banda.

GUARDIÁN DE LA SALUD

Al rescate de los corazones enfermos

Las *enfermedades cardiovasculares* (desórdenes del corazón y los vasos sanguíneos) son la principal causa de muerte en Estados Unidos. Según la Asociación Estadounidense de Cardiología, las enfermedades cardiovasculares cobran una vida cada 35 segundos, lo que representa más de 900,000 muertes al año en ese país, algo que no sorprende. El corazón debe contraerse vigorosamente más de 2500 millones de veces en la vida, sin detenerse un momento a descansar, bombeando sangre por vasos cuya longitud total daría dos veces la vuelta al mundo. Como esos vasos podrían constreñirse, debilitarse u obstruirse por diversos motivos, el sistema cardiovascular es un candidato de importancia para un funcionamiento defectuoso.

LA ATEROSCLEROSIS OBSTRUYE LOS VASOS SANGUÍNEOS

La **aterosclerosis** (que proviene de las palabras griegas *athera*, que significa "papilla" o "engrudo", y scleros, "duro") hace que las paredes de las arterias grandes se engruesen y pierdan elasticidad. Ello se debe a depósitos, llamados **placas**, dentro de las paredes arteriales. Uno de los principales factores de riesgo para la formación de placa es un alto nivel de *colesterol LDL*, que consiste en moléculas de colesterol unidas a moléculas portadoras formadas a partir de lípidos y proteínas (lipoproteínas de baja densidad, *LDL)*. Al parecer, la formación de placa se inicia por un daño menor en el revestimiento endotelial de las arterias, que puede ser provocado por hipertensión, toxinas provenientes del humo del cigarrillo, o por otros factores. El endotelio dañado atrae glóbulos blancos, que excavan debajo de él e ingieren grandes cantidades de colesterol y otros lípidos. Los cuerpos hinchados de estos macrófagos contribuyen a hacer crecer el centro graso de la placa. Mientras tanto, células musculares lisas de la parte inferior del endotelio migran hacia el centro, absorben más grasa y colesterol y contribuyen a engrosar la placa. También producen proteínas que forman un revestimiento fibroso que remplaza el endotelio dañado y cubre el centro graso (**FIGURA E32-1**).

El revestimiento fibroso podría romperse, exponiendo a la sangre a factores que promueven la formación de coágulos dentro de la placa. Estos coágulos obstruyen aún más la arteria y podrían bloquearla por completo (véase la imagen en el recuadro al inicio de este capítulo). Otra posibilidad es que el coágulo sea transportado por el torrente sanguíneo hasta bloquear una parte más estrecha de la arteria. Los coágulos arteriales son la causa de las consecuencias más graves de la aterosclerosis: los *infartos al miocardio* y los *accidentes cerebrovasculares*.

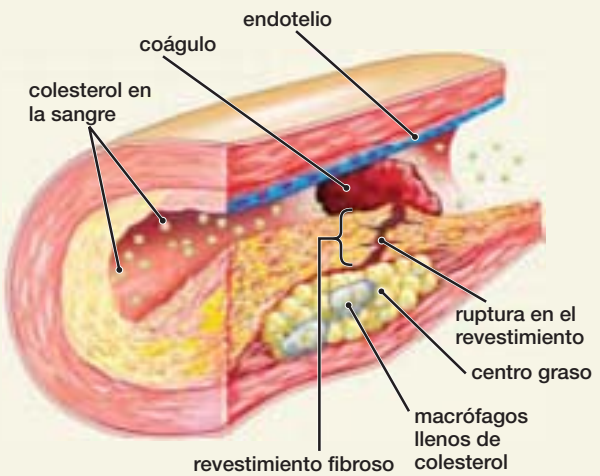


FIGURA E32-1 Las placas obstruyen las arterias
Cuando el revestimiento fibroso se rompe, se forma un coágulo que obstruye la arteria.

Se presenta un **infarto al miocardio** cuando se bloquea una de las arterias que suministran sangre al músculo cardiaco. Privado de nutrimentos y oxígeno, el músculo cardiaco abastecido por la arteria bloqueada muere de forma rápida y dolorosa. Aunque los infartos al miocardio son la principal causa de muerte por aterosclerosis, esta enfermedad hace que se formen placas y coágulos en arterias de todo el cuerpo. Si un coágulo obstruye una arteria que abastece al cerebro, puede causar un **accidente cerebrovascular**, que también se conoce como *infarto cerebral*. Los accidentes cerebrovasculares pueden tener graves consecuencias porque las células del cerebro requieren de una gran cantidad de oxígeno y mueren en minutos si la sangre no llega a ellas. Dependiendo del grado o ubicación del daño cerebral, los accidentes cerebrovasculares provocan una variedad de problemas neurológicos incluyendo parálisis parcial, dificultades para recordar, comunicarse o aprender, cambios repentinos de humor o cambios en la personalidad.

TRATAMIENTO PARA LA ATEROSCLEROSIS

Las causas de la aterosclerosis son la hipertensión, el tabaquismo, la obesidad, la diabetes, la falta de ejercicio y la predisposición genética, así como niveles elevados de colesterol LDL en la sangre. El tratamiento tradicional de la aterosclerosis incluye cambios en la dieta y el estilo de vida, pero si esto falla, existen medicamentos que pueden bajar los niveles de colesterol. Si una persona sufrió un accidente cerebrovascular o padece de **angina de pecho**, que es dolor en el pecho provocado por un suministro insuficiente de sangre al corazón, podría ser un candidato a cirugía para ensanchar la arteria obstruida o una cirugía de derivación coronaria (*bypass*).

La *angioplastia* se refiere a técnicas que permiten ensanchar las arterias coronarias obstruidas (**FIGURA E32-2**). Todos estos procedimientos implican hacer deslizar un tubo delgado y flexible a través de una arteria en el muslo o el brazo y guiarlo hasta la arteria obstruida. En la angioplastia de globo, el tubo tiene en el extremo un pequeño globo que se infla, comprimiendo la placa y permitiendo que la sangre fluya más libremente (**FIGURA E32-2b**). De manera alternativa, el globo podría estar equipado con unas pequeñas navajas giratorias que cortan la placa conforme ésta se comprime. Otro método utiliza un pequeño taladro de elevada rapidez con punta de diamante que tritura la placa en piezas microscópicas, las cuales son transportadas por la sangre (**FIGURA E32-2c**). Después de que los médicos eliminan la placa, a menudo insertan una malla de alambre en forma de tubo o *stent* dentro de la arteria para ayudar a mantenerla abierta (**FIGURA E32-2d**).

La *cirugía de derivación coronaria* o *bypass* consiste en pasar por alto una o más arterias coronarias obstruidas, con un trozo de vena (por lo regular obtenido de la pierna del paciente; **FIGURA E32-3**) o de una arteria (a menudo del antebrazo del paciente). Pero remover una vena es un procedimiento doloroso y que lleva mucho tiempo; además, miles de pacientes que podrían beneficiarse con una operación de este tipo no tienen vasos sanguíneos adecuados para injertarse. En un esfuerzo por ayudar a estos pacientes, los investigadores están tratando de desarro-

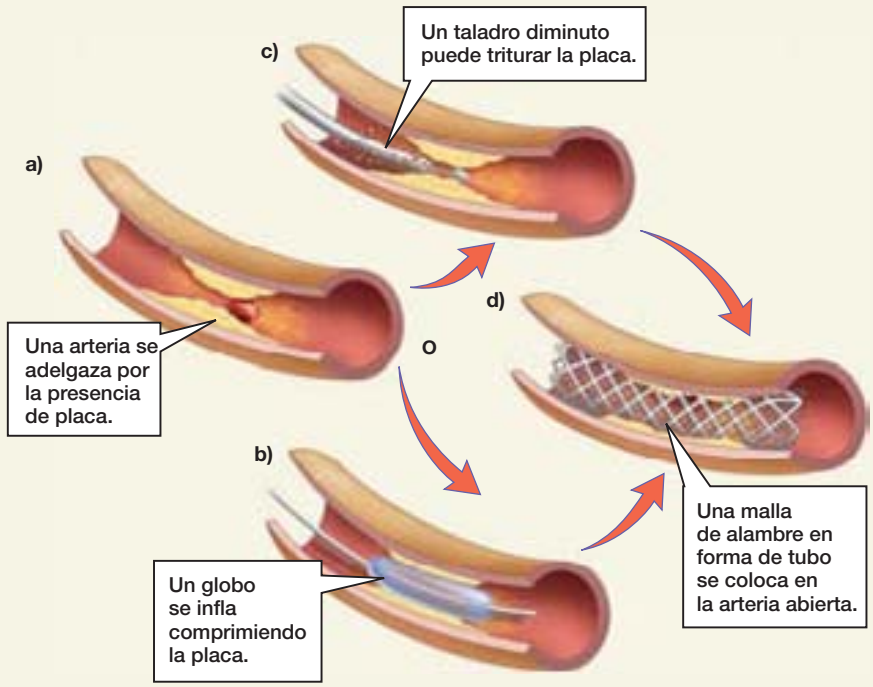

c)
Un taladro diminuto puede triturar la placa.
a)
Una arteria se adelgaza por la presencia de placa.
O
d)
b)
Un globo se infla comprimiendo la placa.
Una malla de alambre en forma de tubo se coloca en la arteria abierta.

FIGURA E32-2 La angioplastia destapa las arterias
a) Una arteria adelgazada puede abrirse mediante un procedimiento consistente en ***b)*** inflar un pequeño globo en su interior o en ***c)*** triturar la placa. Después de la angioplastia, ***d)*** una malla de metal en forma de tubo se inserta para mantener la arteria abierta.

llar vasos artificiales. La proteína de colágeno de cerdos o vacas, moldeada en forma de tubos, podría colocarse en un caldo nutritivo con células de vasos sanguíneos o injertarse directamente en los vasos de animales de experimentación. Las células vivas de vasos sanguíneos invadirán y cubrirán estos tubos para formar vasos funcionales, al menos temporalmente. Un nuevo procedimiento utiliza las propias células del paciente, cultivadas en un recipiente de plástico en el laboratorio. Aunque este procedimiento parece prometedor, requerirá de años para desarrollarse y probarse antes de que se utilice en los seres humanos.

Si ocurre un infarto al miocardio, un tratamiento oportuno puede minimizar el daño e incrementar significativamente las oportunidades de supervivencia del paciente. Los coágulos en las arterias coronarias o en el cerebro pueden disolverse inyectando una proteína "destructora de coágulos" (*activador plasminógeno del tejido, tPA*), que activa una enzima (la plasmina), la cual se encarga de romper la fibrina, la proteína que mantiene unidos los coágulos de sangre. Este medicamento es efectivo sólo si se administra en las siguientes horas después de que ocurre la obstrucción, de manera que muchos pacientes pierden esta oportunidad para tener una mejor recuperación. Recientemente, un agente destructor de coágulos más potente se probó en seres humanos, con resultados alentadores. Esta proteína se llama *DSPA*, que significa *Activador plasminógeno salival del Desmodus*, y se descubrió en la saliva del vampiro (del género Desmodus), el cual secreta la sustancia para que el proceso de coagulación no interfiera con su alimento consistente en sangre. Esta proteína única no sólo funciona mejor, sino que puede administrarse incluso nueve horas después de que se forma un coágulo, por lo que podría ayudar a muchas más personas en comparación con la tPA. Aunque las enfermedades cardiacas siguen siendo la principal causa de muerte en Estados

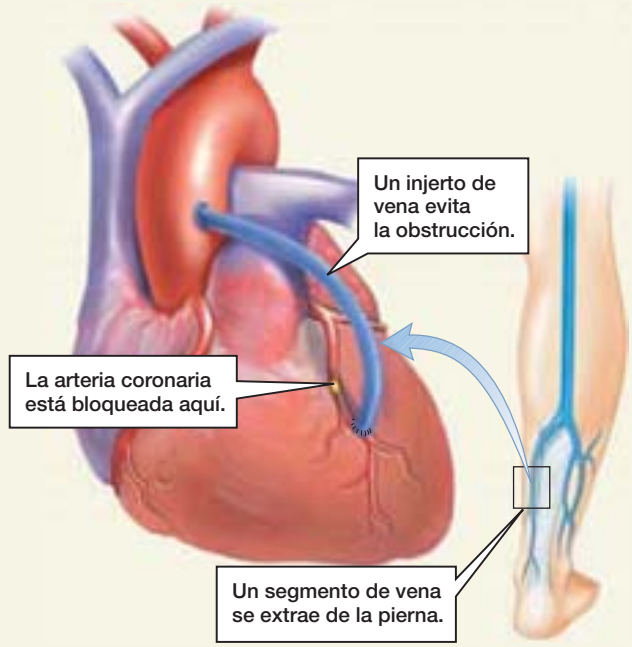

Un injerto de vena evita la obstrucción.
La arteria coronaria está bloqueada aquí.
Un segmento de vena se extrae de la pierna.

FIGURA E32-3 Cirugía de derivación coronaria o bypass

Unidos, un consistente progreso en el tratamiento ha reducido significativamente la tasa de muertes y las discapacidades derivadas de la aterosclerosis.

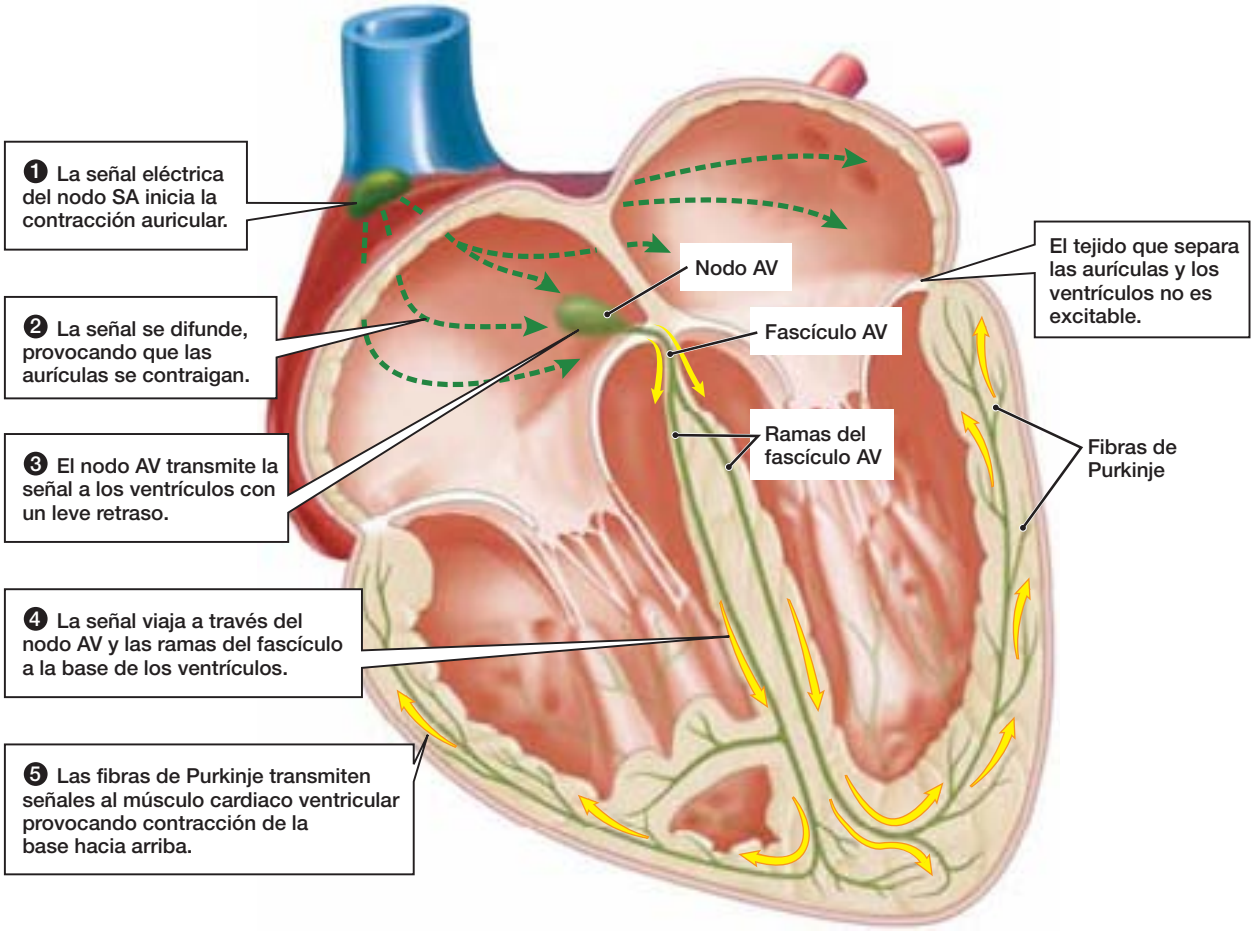
alta de las dos lecturas) se mide durante la contracción ventricular y la *presión diastólica* se mide entre contracciones. La presión sanguínea alta, también llamada **hipertensión**, es causada por la constricción de las arteriolas, lo que provoca resistencia al flujo sanguíneo y tensión en el corazón. En la mayoría de los casos, la causa es desconocida. Una lectura aproximada en el límite de la presión alta es 140/90. La hipertensión también contribuye al "endurecimiento de las arterias", como se describe en la sección "Guardián de la Salud: Al rescate de los corazones enfermos".

Las válvulas mantienen la dirección del flujo sanguíneo e impulsos eléctricos coordinan la sucesión de contracciones

Cuando los ventrículos se contraen, la sangre debe salir por las arterias y no regresar a las aurículas. Luego, una vez que la sangre ha entrado en las arterias, debe impedirse que regrese al corazón cuando éste se relaja. Válvulas unidireccionales se encargan de mantener la dirección del flujo sanguíneo (véase las figuras 32-3 y 32-5). La presión en una dirección las abre fácilmente, pero la presión inversa las cierra herméticamente. Las **válvulas auriculoventriculares** permiten que la sangre fluya de las aurículas a los ventrículos (pero no a la inversa), y las **válvulas semilunares** permiten que entre sangre en la arteria pulmonar y en la aorta cuando se contraen los ventrículos, pero impiden que regrese cuando éstos se relajan. No hay válvulas que separen las aurículas izquierda y derecha de la vena pulmonar y de las venas cavas, respectivamente. De hecho, cuando las aurículas se contraen, algo de sangre fluye de regreso en estas venas; pero puesto que los ventrículos se llenan adecuadamente a pesar de este flujo hacia atrás, no se han desarrollado válvulas en esos lugares.

La contracción del corazón se inicia y coordina por medio de un **marcapasos**, un cúmulo de células especializadas de músculo cardiaco que producen señales eléctricas espontáneas a un ritmo regular. Estas señales eléctricas se transmiten entre las células musculares del corazón y las estimulan a contraerse. El marcapasos primario del corazón es el **nodo sinoauricular (SA)**, situado en la pared superior de la aurícula derecha (**FIGURA 32-7**). Las uniones abiertas que unen células cardiacas adyacentes permiten que las señales eléctricas pasen libre y rápidamente de las células cercanas al marcapasos a las células auriculares colindantes.

Durante el ciclo cardiaco, las aurículas se contraen primero y vierten su contenido en los ventrículos, luego se vuelven


❶ La señal eléctrica del nodo SA inicia la contracción auricular.
❷ La señal se difunde, provocando que las aurículas se contraigan.
❸ El nodo AV transmite la señal a los ventrículos con un leve retraso.
❹ La señal viaja a través del nodo AV y las ramas del fascículo a la base de los ventrículos.
❺ Las fibras de Purkinje transmiten señales al músculo cardiaco ventricular provocando contracción de la base hacia arriba.
Nodo AV
Fascículo AV
Ramas del fascículo AV
El tejido que separa las aurículas y los ventrículos no es excitable.
Fibras de Purkinje

a llenar mientras los ventrículos se contraen. Así, hay un retraso entre la contracción auricular y la ventricular. ¿Cómo se realiza esto? Desde el nodo SA, un impulso eléctrico crea una ola de contracción que corre por los músculos tanto de la aurícula derecha como de la izquierda, las cuales se contraen en sincronía. Luego, la señal llega a una barrera de tejido no excitable entre las aurículas y los ventrículos. Ahí, la excitación se canaliza a través del **nodo auriculoventricular (AV)**, una masa pequeña de células musculares especializadas situadas en la base de la aurícula derecha (véase la figura 32-7). El impulso se conduce lentamente en el nodo AV y pospone brevemente la contracción ventricular. Este retraso da tiempo a las aurículas para completar la transferencia de sangre a los ventrículos, antes de que se inicie la contracción ventricular. Desde el nodo AV, la señal de contracción se difunde a lo largo de tractos especializados de fibras musculares de conducción rápida, comenzando con el *fascículo AV*, que envía sus ramas, llamadas *ramas del fascículo AV*, a la parte inferior de ambos ventrículos. Aquí, los tractos se ramifican aún más para formar las **fibras de Purkinje**, las cuales transmiten la señal eléctrica de contracción hacia arriba dentro de las paredes ventriculares (véase la figura 32-7). El impulso viaja rápidamente por estas fibras y luego a través de las fibras musculares cardiacas comunicantes, lo que hace que los ventrículos se contraigan simultáneamente de la base hacia arriba forzando a la sangre a subir a la arteria pulmonar y la aorta.

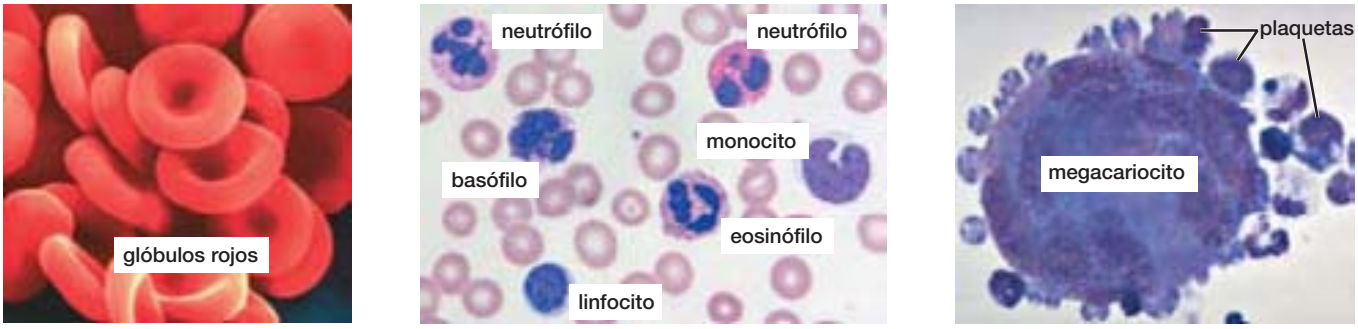
Diversos desórdenes pueden interferir en la compleja serie de sucesos que producen el ciclo cardiaco normal. Cuando el marcapasos falla, o si otras áreas del corazón se vuelven más excitables y usurpan la función del marcapasos, se presentan contracciones sin coordinación e irregulares denominadas *fibrilación*. La fibrilación de los ventrículos puede ser mortal, porque el tembloroso músculo no logra bombear la sangre. Una máquina desfibriladora aplica una sacudida eléctrica al corazón para sincronizar la contracción de las células del músculo ventricular; a veces, esto permite al marcapasos reanudar su función coordinadora normal.

El sistema nervioso y las hormonas influyen en el ritmo cardiaco

El ritmo cardiaco está en perfecta sintonía con el nivel de actividad del cuerpo, ya sea que estemos corriendo para llegar a tiempo a clase o que estemos acostados tomando el Sol. Por su cuenta, el marcapasos del nodo SA mantendría un ritmo constante de aproximadamente 100 latidos por minuto. Sin embargo, ciertos impulsos nerviosos y hormonas alteran significativamente el ritmo cardiaco. En una persona en reposo, la actividad del sistema nervioso parasimpático, que controla las funciones del cuerpo durante periodos de reposo (véase el capítulo 38), frena el ritmo cardiaco a cerca de 70 latidos por minuto (este ritmo durante el reposo comúnmente es más bajo en los atletas). Cuando el ejercicio o la tensión exigen un mayor abasto de sangre a los músculos, el sistema nervioso simpático (que prepara al cuerpo para acciones de emergencia) acelera el ritmo cardiaco. Asimismo, la hormona epinefrina (también llamada adrenalina) eleva el ritmo cardiaco al tiempo que moviliza a todo el cuerpo para responder a sucesos amenazantes o que provocan excitación. Por ejemplo, cuando los astronautas estaban alunizando, su ritmo cardiaco era de más de 170 latidos por minuto, ¡aunque se encontraban sentados en su nave espacial!

32.3 ¿QUÉ ES LA SANGRE?

La sangre, que bien podría llamarse "el río de la vida", transporta nutrimentos, gases, hormonas y desechos disueltos por el cuerpo. Tiene dos componentes principales: **1.** un líquido llamado **plasma**, y **2.** componentes celulares (*glóbulos rojos, glóbulos blancos y plaquetas*) suspendidos en el plasma (**FIGURA 32-8**). En promedio, los componentes celulares de la sangre representan del 40 a 45 por ciento de su volumen; el 55 o 60 por ciento restante es plasma. El ser humano promedio tiene de 5 a 6 litros de sangre, que constituye aproximadamente el 8 por ciento de su peso corporal. Los componentes de la sangre se resumen en la **tabla 32-1**.



a) Eritrocitos **b) Glóbulos blancos** **c) Megacariocito produciendo plaquetas**

FIGURA 32-8 Tipos de células sanguíneas
a) Esta micrografía en color falso tomada con microscopio electrónico de barrido muestra claramente la forma de disco bicóncavo de los glóbulos rojos. ***b)*** Esta foto compuesta de glóbulos blancos teñidos muestra los cinco tipos diferentes que existen. ***c)*** Las plaquetas son piezas de citoplasma encerradas en una membrana; aquí se observa cómo brotan de un solo megacariocito. PREGUNTA: ¿Por qué una dieta deficiente en hierro provoca anemia (una condición caracterizada por escasez de glóbulos rojos para suministrar oxígeno)?

Tabla 32-1 Composición de la sangre

Componentes del plasma (55% de la sangre)	Funciones
Agua	Disuelve otros componentes Hace fluida la sangre
Proteínas	
Albúmina	Mantiene la osmolaridad
Protrombina	Da origen a la trombina, que promueve la coagulación
Fibrinógeno	Da origen a la fibrina, que promueve la coagulación
Globulina	Combate las infecciones; transporta sustancias; promueve la coagulación
Sales (sodio, potasio, calcio, magnesio, bicarbonato, cloro)	Mantiene la osmolaridad y el pH; permite la actividad neuronal y la contracción muscular
Componentes celulares (45% de la sangre)	**Funciones**
Glóbulos rojos ($5{,}000{,}000$ por mm^3)	Transportan oxígeno y algo de dióxido de carbono
Glóbulos blancos ($5{,}000$-$10{,}000$ por mm^3)	Combaten infecciones y enfermedades
Plaquetas ($250{,}000$ por mm^3)	Importantes en la coagulación de la sangre
Sustancias transportadas en la sangre	
Desechos metabólicos: dióxido de carbono, urea, amoniaco	
Oxígeno: permite la producción de energía utilizando la respiración celular	
Nutrimentos: glucosa, aminoácidos, lípidos, vitaminas	
Hormonas: influyen en el crecimiento, el desarrollo y las actividades metabólicas	

El plasma es primordialmente agua en la que se disuelven proteínas, sales, nutrimentos y desechos

El agua constituye casi el 90 por ciento del plasma, cuyo color es amarillo pálido. Disueltas en el plasma hay proteínas y sales. La sangre también sirve como sistema de transporte para las hormonas, los nutrimentos, los gases y los desechos (véase la tabla 32-1). Las proteínas del plasma son las más abundantes de las sustancias disueltas. Las tres principales proteínas plasmáticas son: las *albúminas*, las cuales ayudan a mantener la presión osmótica de la sangre (que controla el flujo de agua a través de las membranas plasmáticas); las *globulinas*, que transportan nutrimentos y desempeñan un papel importante en el sistema inmunitario; y el *fibrinógeno*, importante en la coagulación de la sangre, como veremos más adelante.

Los glóbulos rojos llevan oxígeno de los pulmones a los tejidos

Las células más abundantes en la sangre son las que transportan oxígeno: los llamados glóbulos rojos o **eritrocitos** llo, tiene mayor área superficial que una célula esférica del mismo volumen, e incrementa la capacidad de la célula para absorber y liberar oxígeno a través de su membrana plasmática.

El color rojo de los eritrocitos se debe a una proteína de gran tamaño que contiene hierro, la **hemoglobina** (FIGURA 32-9; descrita en el capítulo 3). La hemoglobina representa cerca de un tercio del peso de cada glóbulo rojo. Una molécula de hemoglobina puede unirse y transportar a cuatro moléculas de oxígeno (una en cada grupo hem, como se destaca con los discos verdes en la figura 32-9). La hemoglobina permite a la sangre transportar mucho más oxígeno que si lo llevara disuelto en el plasma. Cuando la hemoglobina se une al oxígeno, adopta un color rojo cereza; cuando pierde el oxígeno adquiere un tono más oscuro. Como la sangre desoxigenada se encuentra en las venas, que aparecen con una tonalidad azulosa cuando se les observa a través de la piel, en la mayoría de los diagramas las arterias se representan en color rojo y las venas en azul. La hemoglobina se une débilmente al oxígeno, al que capta en los capilares de los pulmones, donde la concentración de oxígeno es alta, y lo libera en otros tejidos del cuerpo, donde su concentración es baja. Después de liberar su oxígeno, una parte de la hemoglobina capta dióxido de carbono de los tejidos y lo transporta de regreso a los pulmones. El papel de la sangre en el intercambio de gases se estudiará más a fondo en el capítulo 33.

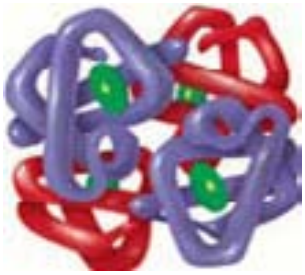


FIGURA 32-9 Hemoglobina

Una "sangre artificial" que contiene hemoglobina purificada extraída de los glóbulos rojos humanos se está probando en centros hospitalarios con los pacientes que han sufrido intensas hemorragias. El producto obtenido puede almacenarse durante mucho más tiempo que la sangre fresca, no transmite enfermedades y puede transfundirse inmediatamente porque es compatible con cualquier tipo de sangre. Esto puede hacer la diferencia entre la vida y la muerte para una persona que ha sufrido hemorragia masiva.

Los glóbulos rojos tienen una vida relativamente corta

Una retroalimentación negativa regula el número de glóbulos rojos

El número de glóbulos rojos en la sangre determina qué tanto oxígeno puede transportar; estos niveles se mantienen mediante un sistema de retroalimentación negativa en el que interviene la hormona **eritropoyetina**, la cual se produce en los riñones y se libera a la sangre como respuesta a una deficiencia de oxígeno. Esta falta de oxígeno podría deberse a una pérdida de sangre, a una producción insuficiente de hemoglobina, a una altitud elevada (donde hay menos oxígeno) o a una enfermedad de los pulmones que interfiere con el intercambio de gases en estos órganos. La hormona estimula la producción rápida de nuevos glóbulos rojos en la médula ósea. Una vez que se restablecen niveles adecuados de oxígeno, la producción de eritropoyetina baja y el ritmo de producción de glóbulos rojos vuelve a la normalidad (**FIGURA 32-10**).

Los glóbulos blancos ayudan a defender al cuerpo contra las enfermedades

Los glóbulos blancos, o **leucocitos**, son de cinco tipos: *neutrófilos, eosinófilos, basófilos, linfocitos* y *monocitos.* En conjunto, constituyen menos del 1 por ciento de todas las células de la sangre (véase la figura 32-8b). Al igual que todas las células sanguíneas, los glóbulos blancos se producen en la médula ósea. Todos los glóbulos blancos tienen alguna función que protege al cuerpo contra enfermedades y usan el sistema circulatorio para desplazarse al lugar de la invasión. Algunos, como los monocitos, viajan por los capilares hasta heridas por las que han entrado bacterias y luego se salen por aberturas estrechas en las paredes de los capilares. Después de salir de los capilares, los monocitos se convierten en células parecidas a amibas llamadas **macrófagos** (que literalmente significa "grandes comedores") y envuelven a partículas extrañas, como bacterias y células cancerosas (**FIGURA 32-11**). Por lo regular, los macrófagos mueren en el proceso y tales microorganismos muertos se acumulan y contribuyen a formar la sustancia blanca llamada *pus*, que a menudo se observa en los sitios infectados. Los **linfocitos**, que describiremos en el capítulo 36, se encargan de producir anticuerpos que ayudan a inmunizar contra enfermedades. Las células que dan origen a los linfocitos migran desde la médula ósea a través de la corriente sanguínea hasta tejidos del sistema linfático, como el timo, el bazo y los ganglios linfáticos, que describiremos más adelante.

FIGURA 32-11 Un glóbulo blanco ataca a las bacterias
Estas bacterias (pequeñas esferas verdes) son *Escherichia coli.* Algunas formas de estas bacterias intestinales podrían causar enfermedades si entran en el torrente sanguíneo.

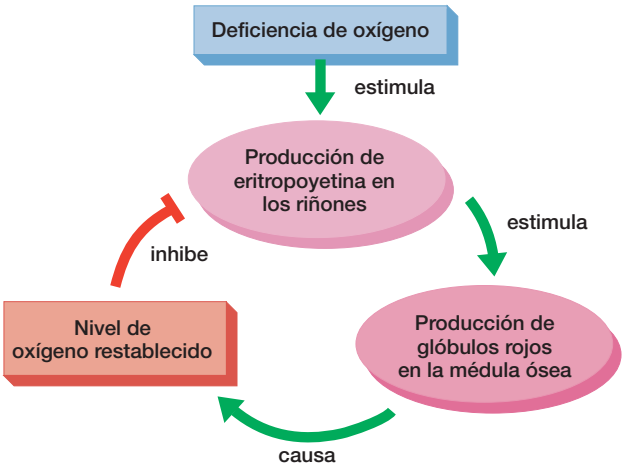


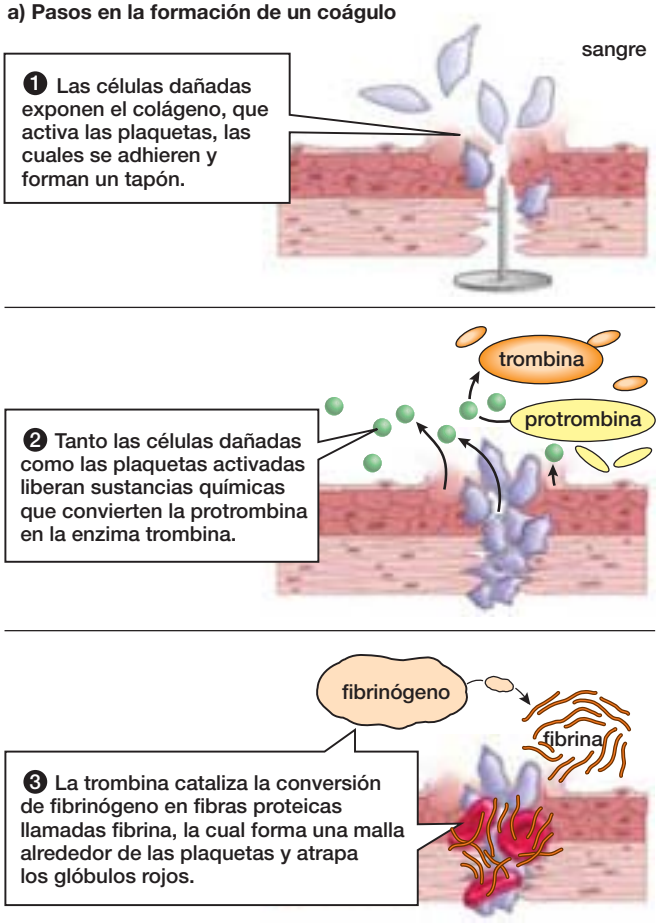
FIGURA 32-10 Regulación de los glóbulos rojos por retroalimentación negativa
PREGUNTA: Algunos atletas de resistencia engañan practicando el dopaje: se inyectan grandes dosis de eritropoyetina. ¿Por qué esto les da una ventaja competitiva?

Las plaquetas son fragmentos celulares que ayudan a coagular la sangre

Las **plaquetas**, que son cruciales para la coagulación de la sangre, son trozos de células grandes llamadas *megacariocitos.* Los megacariocitos permanecen en la médula ósea, donde separan trozos de su citoplasma envueltos por membrana para formar plaquetas (véase la figura 32-8c). Luego, las plaquetas entran en la sangre y desempeñan un papel central en su coagulación. Al igual que los glóbulos rojos, las plaquetas carecen de núcleo y su vida es aún más corta, de 10 a 12 días.

La **coagulación de la sangre** es un proceso complejo que evita que nos desangremos hasta morir, no sólo como consecuencia de traumatismos, sino también por el desgaste natural del cuerpo. La coagulación (**FIGURA 32-12a**) inicia cuando la sangre entra en contacto con un tejido dañado, por ejemplo, un vaso sanguíneo que tiene una pared rota. La superficie rasgada expone la proteína colágeno, la cual provoca que las plaquetas se adhieran y bloqueen parcialmente la abertura. Las plaquetas pegadas y las células lesionadas liberan diversas sustancias, iniciando una compleja serie de reacciones entre las proteínas que circulan en el plasma. Un importante resultado de estas reacciones químicas es la producción de la enzima **trombina** a partir de su forma inactiva, la *protrombina*. La trombina cataliza la conversión de la proteína plasmática llamada **fibrinógeno** en moléculas filamentosas insolubles llamadas **fibrina**. Las moléculas de fibrina se adhieren unas a otras para formar una red fibrosa alrededor de las plaquetas acumuladas. Esta red proteica atrapa glóbulos rojos y más plaquetas (**FIGURA 32-12b**

a) Pasos en la formación de un coágulo


sangre
❶ Las células dañadas exponen el colágeno, que activa las plaquetas, las cuales se adhieren y forman un tapón.
trombina
protrombina
❷ Tanto las células dañadas como las plaquetas activadas liberan sustancias químicas que convierten la protrombina en la enzima trombina.
fibrinógeno
fibrina
❸ La trombina cataliza la conversión de fibrinógeno en fibras proteicas llamadas fibrina, la cual forma una malla alrededor de las plaquetas y atrapa los glóbulos rojos.

b) Micrografía electrónica de barrido de un coágulo sanguíneo

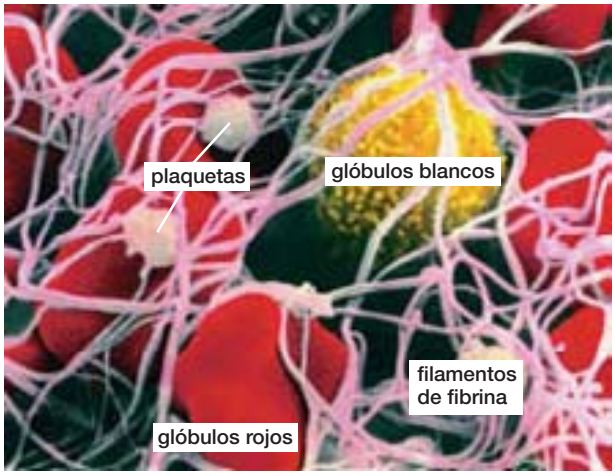


FIGURA 32-12 Coagulación de la sangre

Los tejidos lesionados y las plaquetas que se les adhieren inician una compleja serie de reacciones bioquímicas entre las proteínas de la sangre, que conducen a la formación de un coágulo. Aquí se muestra una secuencia simplificada. ***b)*** La proteína filamentosa fibrina produce una masa pegajosa y enmarañada que atrapa glóbulos rojos y finalmente forma un coágulo.

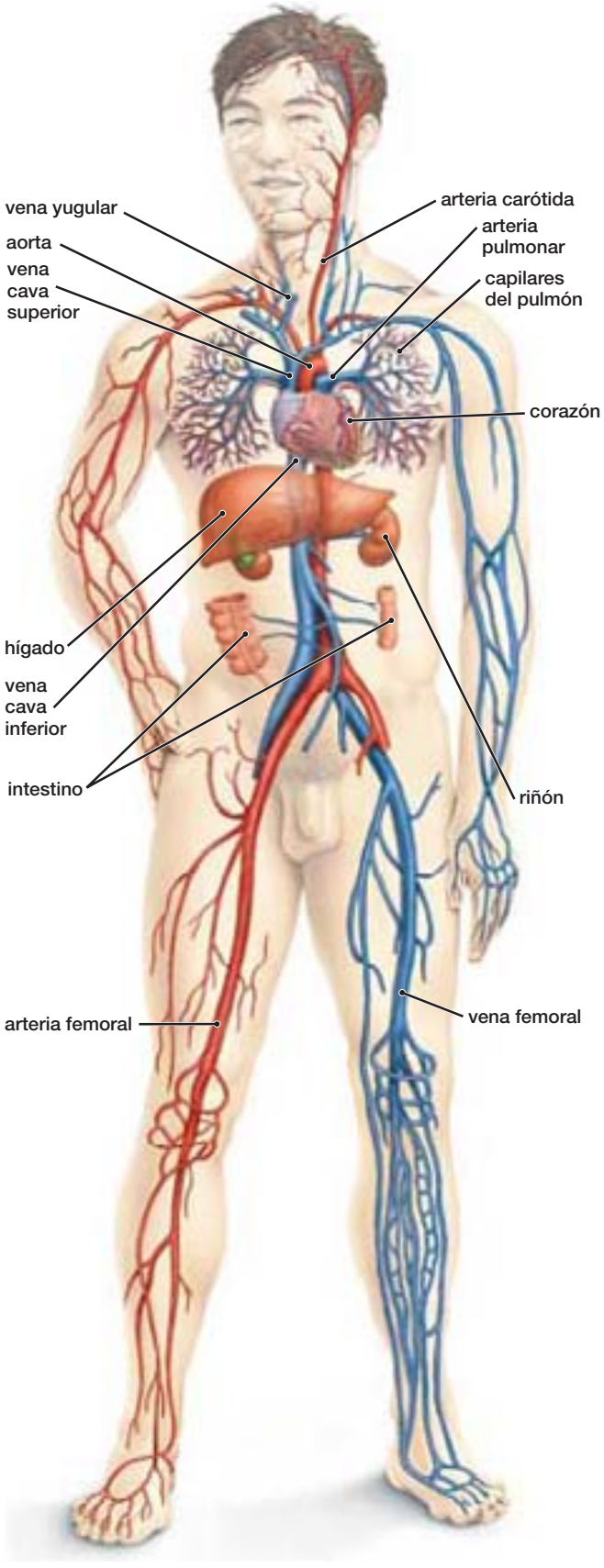


FIGURA 32-13 El sistema circulatorio humano

Casi todas las venas (derecha) transportan sangre desoxigenada al corazón y casi todas las arterias (izquierda) transportan sangre oxigenada desde el corazón. Las venas pulmonares (que llevan sangre oxigenada) y las arterias pulmonares (que llevan sangre desoxigenada) son excepciones. Todos los órganos reciben sangre de las arterias, la devuelven por las venas y son alimentados por capilares microscópicos (los capilares de los pulmones están muy amplificados).

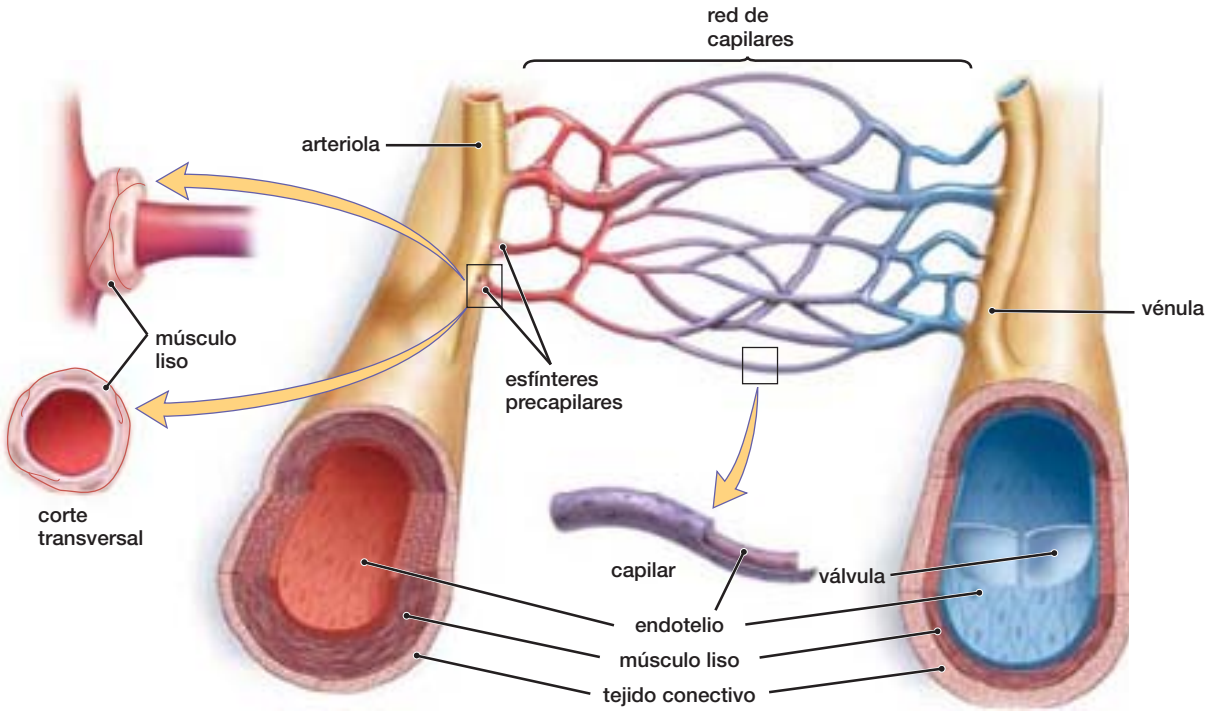


FIGURA 32-14 Estructuras e interconexiones de los vasos sanguíneos
Las arterias y arteriolas son más musculares que las venas y vénulas. La sangre oxigenada se mueve de las arterias a las arteriolas y a los capilares. Las paredes de los capilares sólo tienen una célula de espesor. Éstos vacían sangre desoxigenada a las vénulas, que desembocan en venas. Los esfínteres precapilares regulan el movimiento de la sangre de las arteriolas a los capilares.

fibrosa producen proyecciones pegajosas que se sujetan unas a otras. En menos de media hora, las plaquetas se contraen, aprietan la trama y expulsan el líquido. Esta acción forma un coágulo más denso y duro (en la piel, lo llamamos *costra*), que también constriñe la herida, juntando las superficies dañadas para promover su cicatrización.

A pesar de la capacidad de la sangre para coagularse, cada año decenas de miles de personas se desangran hasta morir por heridas de arma de fuego o de otro tipo. Los investigadores han desarrollado vendas impregnadas con grandes cantidades de trombina y fibrinógeno, para estimular una rápida coagulación. Otros científicos han logrado modificar por ingeniería genética vacas y cerdos para que secreten grandes cantidades de fibrinógeno humano junto con la leche. Estos avances son prometedores para tener un mejor control sobre las hemorragias y para promover una cicatrización más rápida de las heridas en las víctimas.

32.4 ¿QUÉ TIPO DE VASOS SANGUÍNEOS HAY Y QUÉ FUNCIONES TIENEN?

El río de la vida fluye por canales bien definidos llamados *vasos sanguíneos*. El diagrama de la FIGURA 32-13 presenta algunos de los principales vasos sanguíneos del aparato circulatorio humano. Cuando la sangre sale del corazón, viaja de las arterias a las *arteriolas*, los capilares, las *vénulas*

Las arterias y arteriolas son vasos de paredes gruesas que transportan sangre desde el corazón

Las arterias conducen la sangre que sale del corazón. Estos vasos tienen paredes gruesas provistas de músculo liso y tejido conectivo elástico (véase la figura 32-14). Con cada pulsación de sangre de los ventrículos, las arterias se expanden un poco, como globos de pared gruesa. Entre un latido y otro, las paredes elásticas "rebotan" y ayudan a bombear la sangre y a mantener un flujo constante a través de los vasos más pequeños. Las arterias se ramifican para formar vasos de menor diámetro llamados **arteriolas**, las cuales desempeñan un papel importante en la distribución de la sangre dentro del cuerpo, como veremos más adelante.

Los capilares son vasos microscópicos que permiten el intercambio de nutrimentos y desechos entre la sangre y las células del cuerpo

El aparato circulatorio completo es un complejo dispositivo que permite a cada célula del cuerpo intercambiar nutrimentos y desechos por difusión. Las arteriolas conducen la sangre a los **capilares**, que son tan diminutos que los glóbulos rojos deben pasar a través de ellos en una sola fila (FIGURA 32-15

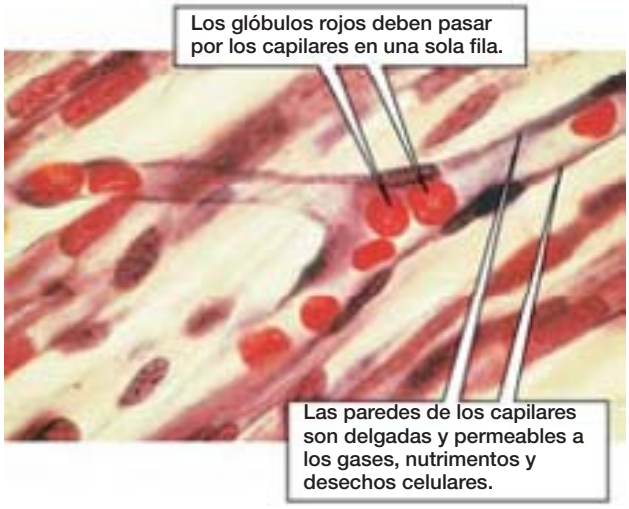

Los glóbulos rojos deben pasar por los capilares en una sola fila.
Las paredes de los capilares son delgadas y permeables a los gases, nutrimentos y desechos celulares.

FIGURA 32-15 Glóbulos rojos fluyen en una sola fila por un capilar
PREGUNTA: ¿Por qué el oxígeno sale de los capilares en los tejidos corporales mientras el dióxido de carbono entra, y no a la inversa?

reducen rápidamente conforme la sangre se mueve a través de esta red angosta y casi interminable de capilares, lo que da más tiempo a que ocurra la difusión.

Con paredes del grosor de una sola célula endotelial (véase la figura 32-4), los capilares están muy bien adaptados para su función de intercambio de materiales entre la sangre y el líquido que baña las células del cuerpo. La presión alta dentro de los capilares que se ramifican de las arteriolas provoca que se filtre líquido continuamente del plasma sanguíneo hacia los espacios alrededor de los capilares. La sustancia resultante, llamada **líquido intersticial**, consiste primordialmente en agua, en la que están disueltos nutrimentos, hormonas, gases, desechos, algunas proteínas y glóbulos blancos. El medio actúa como un intermediario entre las células del cuerpo y la sangre de los capilares, suministrando nutrimentos a las células, al tiempo que acepta sus desechos y otras secreciones.

Las sustancias toman varias rutas a través de las paredes capilares. Los gases, el agua, las hormonas liposolubles y los ácidos grasos pueden difundirse directamente a través de las membranas celulares de los capilares. Los nutrimentos de pequeñas dimensiones e hidrosolubles, como sales, glucosa y aminoácidos, viajan en el fluido intersticial a través de espacios angostos entre células capilares adyacentes. Los glóbulos blancos también pueden salir a través de estas aberturas. Las proteínas grandes pueden ser transportadas a través de las membranas de las células endoteliales en vesículas. Como resultado de la acción de filtración de las paredes capilares, la composición del líquido intersticial difiere de la de la sangre. Mientras que las concentraciones de iones y glucosa son muy similares, el líquido intersticial carece de glóbulos rojos y plaquetas, y tiene mucho menos contenido proteico que el plasma sanguíneo.

La presión dentro de los capilares disminuye conforme la sangre viaja hacia las vénulas, y la alta presión osmótica de la sangre que permanece en el interior de los capilares (debido a la presencia de albúminas y otras proteínas de gran tamaño) hace regresar el agua a los vasos por ósmosis conforme la sangre se aproxima al extremo venoso de los capilares. A medida que el agua se mueve hacia los capilares y la sangre en su interior se vuelve más diluida, las sustancias disueltas en el líquido intersticial tienden a difundirse también de regreso a los capilares. Así, buena parte del líquido intersticial (aproximadamente el 85 por ciento) se reincorpora al torrente sanguíneo a través de las paredes capilares en el lado venoso de la red de capilares. Como aprenderás más adelante en este capítulo, el sistema linfático restituye el líquido restante (véase más adelante la figura 32-17).

Las venas y vénulas llevan sangre de regreso al corazón

Después de recoger dióxido de carbono y otros desechos de las células, la sangre de los capilares drena en vasos más grandes llamados **vénulas**, las cuales desembocan en *venas*, que son aún más grandes (véase la figura 32-14). Las venas ofrecen un camino de baja resistencia para que la sangre regrese al corazón. Las paredes de las venas son más delgadas, menos musculares y más expansibles que las de las arterias, aunque ambas contienen una capa de músculo liso. Puesto que la presión sanguínea en las venas es baja, las contracciones de los músculos esqueléticos durante el ejercicio y la respiración ayudan a regresar sangre al corazón, al exprimir las venas y empujar la sangre por ellas.

Cuando las venas se comprimen, ¿por qué la sangre no se ve impelida a alejarse del corazón así como es empujada hacia este último? Las venas están equipadas con válvulas unidireccionales que sólo permiten el flujo de la sangre hacia el corazón (**FIGURA 32-16**). Cuando estamos sentados o de pie durante mucho tiempo, la falta de actividad favorece que la sangre se acumule en las venas de la parte inferior de las piernas. Por eso es que a veces se nos hinchan los pies después de un vuelo largo en avión. Los periodos largos de inactividad también contribuyen a la aparición de várices, que son venas permanentemente hinchadas porque sus válvulas se han estirado y debilitado.

Si baja la presión sanguínea —por ejemplo, después de una intensa hemorragia—, las venas pueden ayudar a restablecerla. En tales casos, el sistema nervioso simpático (que prepara al cuerpo para acciones de emergencia) estimula automáticamente la contracción de los músculos lisos en las paredes de las venas. Esta acción reduce el volumen interno de las venas y eleva la presión arterial, acelerando el retorno de sangre al corazón.

Las arteriolas controlan la distribución del flujo sanguíneo

Las arteriolas transportan la sangre hacia los capilares, y sus paredes musculares están bajo la influencia de nervios, hormonas y otras sustancias químicas producidas por los tejidos cercanos. Por ello, las arteriolas se contraen y se relajan en respuesta a las necesidades de los tejidos y órganos a los que abastecen. Es común leer en una novela de suspenso que la protagonista "palideció al ver el piso ensangrentado". En efecto, la piel se pone pálida cuando las arteriolas que abastecen de sangre a los capilares de la piel se constriñen porque el sistema nervioso estimula los músculos lisos para que se contraigan. Esta contracción eleva la presión sanguínea en general; pero una constricción selectiva retira la sangre de la piel, donde es menos necesaria en ese momento, y la redirige al corazón y los músculos, donde podría necesitarse para realizar acciones vigorosas.

En un día caluroso, en cambio, nos "ponemos rojos" porque las arteriolas de la piel se dilatan y llevan más sangre a los

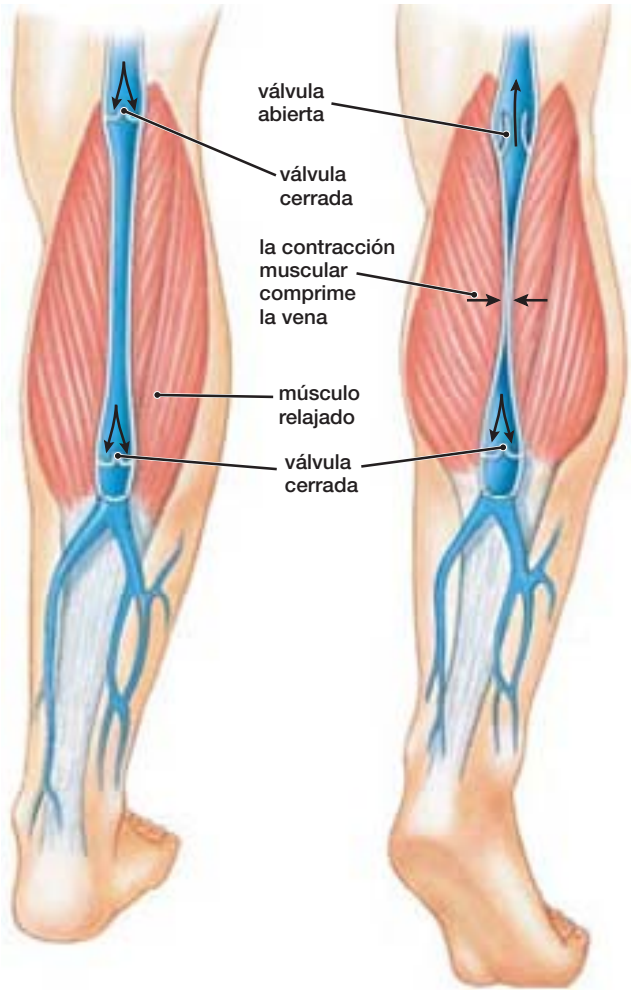


FIGURA 32-16 Las válvulas dirigen el flujo de la sangre en las venas
Las venas y vénulas tienen válvulas unidireccionales que mantienen el flujo de sangre en la dirección correcta. Cuando los músculos cercanos comprimen una vena, las válvulas permiten que fluya sangre hacia el corazón, pero bloquean el flujo en la dirección opuesta.

capilares de ese órgano. Esto permite que el cuerpo disipe el exceso de calor al exterior y mantenga una temperatura interna relativamente constante. En contraste, cuando hace mucho frío, los dedos de las manos y los pies se nos pueden congelar porque las arteriolas que suministran sangre a las extremidades se constriñen. La sangre se desvía a órganos vitales, como el corazón y el cerebro, que no pueden funcionar correctamente si su temperatura es baja. Al minimizar el flujo de sangre a las extremidades que irradian calor normalmente, el cuerpo puede conservar ese calor.

El flujo de sangre en los capilares se regula mediante diminutos anillos de músculo liso, llamados **esfínteres precapilares**, que rodean a las uniones entre arteriolas y capilares (véase la figura 32-14). Estas uniones se abren y se cierran en respuesta a cambios químicos locales que indican las necesidades de los tejidos cercanos. Por ejemplo, la acumulación de dióxido de carbono, ácido láctico u otros desechos celulares indica que los tejidos requieren un mayor flujo de sangre. Estas señales hacen que los esfínteres precapilares y los músculos de las paredes de las arteriolas cercanas se relajen y así pueda fluir más sangre a través de los capilares.

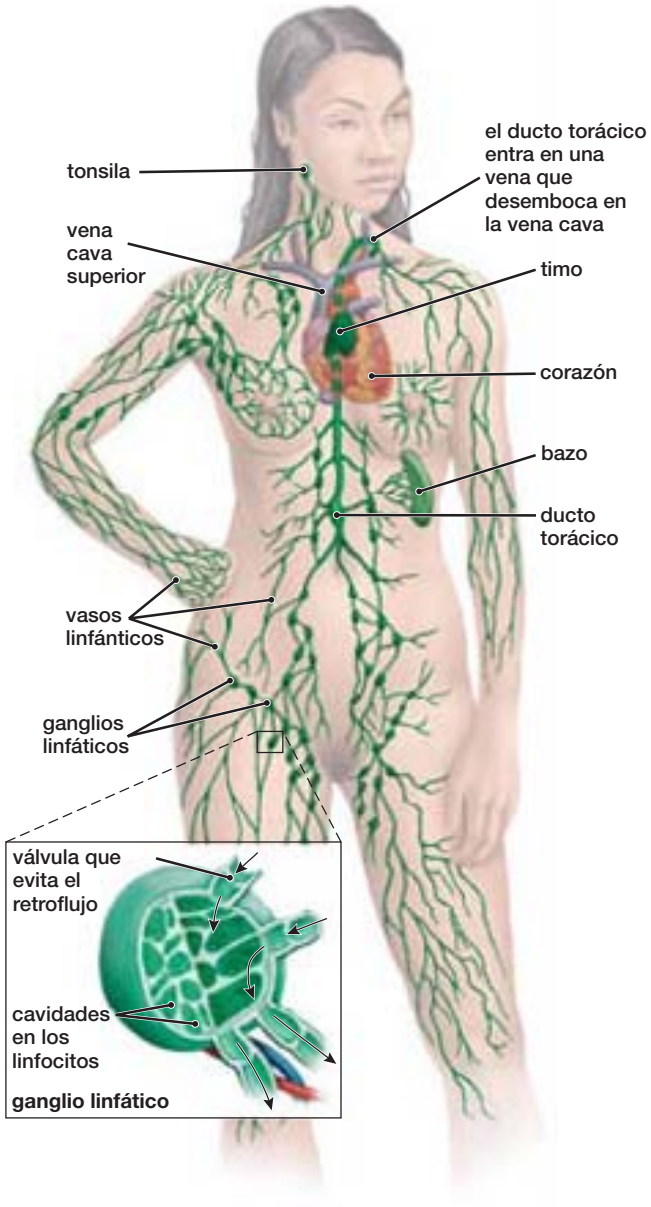


FIGURA 32-17 El sistema linfático humano
Los vasos linfáticos, ganglios linfáticos y dos órganos linfáticos auxiliares: el timo y el bazo. La linfa regresa al sistema circulatorio por medio del ducto torácico. (**Imagen en el recuadro**) Sección transversal de un ganglio linfático. El ganglio está lleno de canales revestidos de glóbulos blancos que atacan a los materiales extraños en la linfa.

¿Qué sucede cuando se rompen los vasos sanguíneos, o se estrechan debido a depósitos de colesterol, o se bloquean con coágulos, y se detiene el flujo del "río de la vida"? Exploramos esas cuestiones en la sección "Guardián de la salud: Al rescate de los corazones enfermos".

32.5 ¿CÓMO COLABORA EL SISTEMA LINFÁTICO CON EL CIRCULATORIO?

El **sistema linfático** consta de una red de capilares linfáticos y vasos más grandes que desembocan en el sistema circulatorio, numerosos *ganglios linfáticos* pequeños, áreas de tejido conectivo rico en linfocitos (que incluyen a las *tonsilas* o *amíg-*

dalas) y dos órganos adicionales: el *timo* y el *bazo* (FIGURA 32-17). Aunque no forma parte estrictamente del aparato circulatorio, el sistema linfático está asociado estrechamente a él. Este sistema tiene varias funciones importantes:

- Devuelve el exceso de líquido intersticial al torrente sanguíneo.
- Transporta grasas del intestino delgado al torrente sanguíneo.
- Defiende al cuerpo al exponer a las bacterias y virus a los glóbulos blancos.

Los vasos linfáticos se parecen a las venas y capilares del sistema circulatorio

Al igual que los capilares sanguíneos, los *capilares linfáticos* forman una compleja red de vasos microscópicamente angostos, de paredes delgadas, en los que las sustancias pueden entrar con facilidad. Las paredes de los capilares linfáticos se componen de células con aberturas entre ellas que actúan como válvulas unidireccionales. Estas aberturas permiten el ingreso de partículas relativamente grandes, junto con líquido, al interior de los capilares linfáticos. A diferencia de los capilares sanguíneos, que forman una red continua conectada, los capilares linfáticos tienen terminaciones ciegas en los tejidos del cuerpo (FIGURA 32-18). Los materiales recolectados por los capilares linfáticos fluyen a vasos linfáticos más grandes. La linfa es bombeada por contracciones rítmicas de los músculos lisos en las paredes de estos vasos. Un posterior impulso para que la linfa fluya proviene de la contracción de los músculos cercanos, como los que intervienen en la respiración y la locomoción. Al igual que en las venas, la dirección del flujo se regula mediante válvulas unidireccionales (FIGURA 32-19).

El sistema linfático devuelve líquidos a la sangre

Como ya explicamos, se intercambian sustancias disueltas entre los capilares y las células del cuerpo por medio de líquido intersticial, que es filtrado del plasma sanguíneo a través de las paredes capilares mediante presión y que baña casi todas las células del cuerpo. En una persona promedio, la diferencia entre la cantidad de líquido que sale de los capilares sanguíneos y la que es reabsorbida por ellos, cada día, es de unos tres o cuatro litros. Una función del sistema linfático es devolver este líquido en exceso y las moléculas disueltas en él a la sangre. A medida que se acumula el líquido intersticial, su presión hace que entre líquido por las aberturas de los capilares linfáticos (véase la figura 32-18). El sistema linfático transporta este líquido, que ahora recibe el nombre de **linfa**, de regreso al sistema circulatorio. La importancia de que el sistema linfático devuelva líquido al torrente sanguíneo es evidente en la condición llamada *elefantiasis* (FIGURA 32-20). Este trastorno, que causa desfiguraciones, es provocado por un nematelminto parásito que coloniza los vasos linfáticos, los cuales cicatrizan y no pueden ya drenar el líquido en exceso.

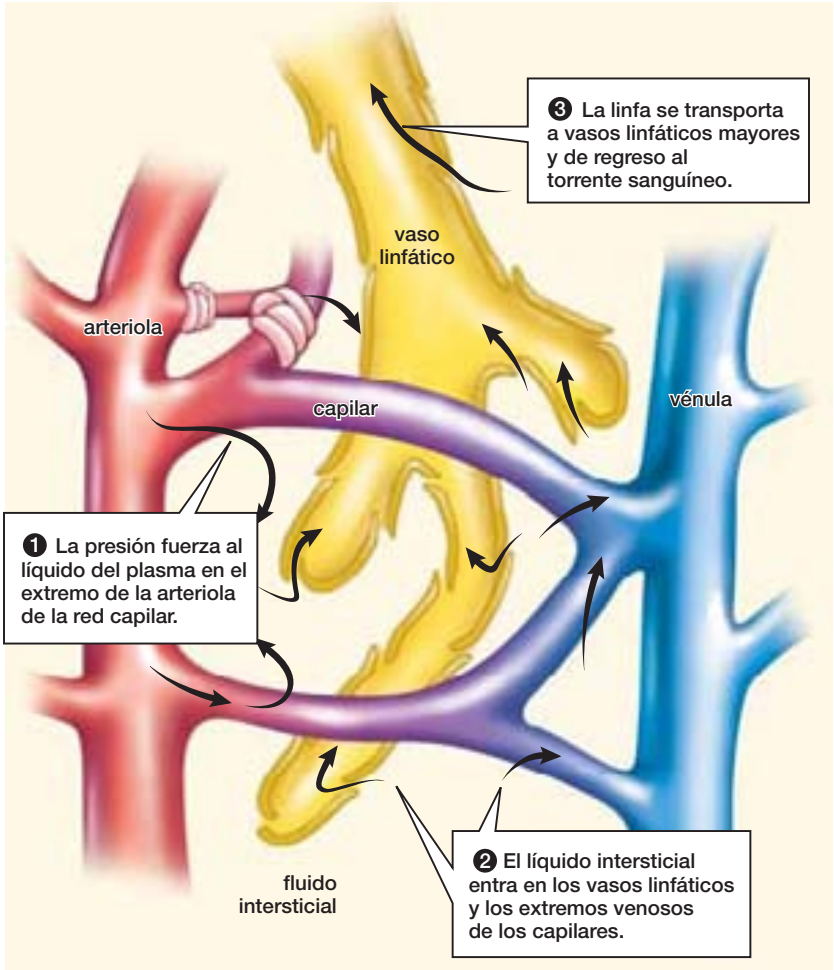

❸ La linfa se transporta a vasos linfáticos mayores y de regreso al torrente sanguíneo.
vaso linfático
arteriola
capilar
vénula
❶ La presión fuerza al líquido del plasma en el extremo de la arteriola de la red capilar.
fluido intersticial
❷ El líquido intersticial entra en los vasos linfáticos y los extremos venosos de los capilares.

FIGURA 32-18 Estructura de los capilares linfáticos
Los capilares linfáticos tienen terminaciones ciegas en los tejidos del cuerpo, donde la presión por la acumulación de líquido intersticial hace que entre líquido en los capilares linfáticos, así como en la parte venosa de la red capilar.

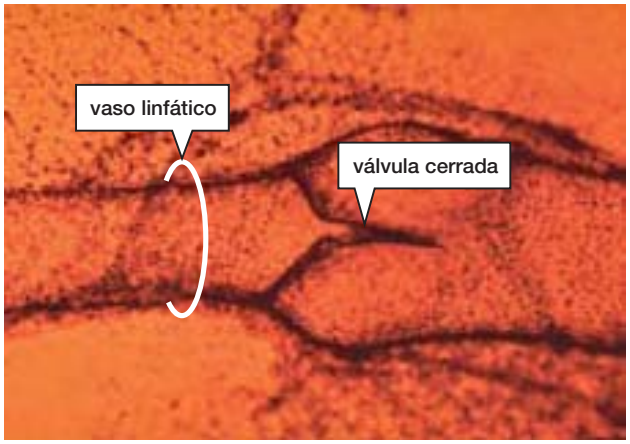


FIGURA 32-19 Válvula de un vaso linfático
Al igual que las venas que transportan sangre, los vasos linfáticos tienen válvulas internas unidireccionales que dirigen el flujo de la linfa hacia las venas grandes en las que desembocan.

FIGURA 32-20 La elefantiasis es consecuencia del bloqueo de vasos linfáticos
Cuando la cicatrización de vasos linfáticos, tras la infección de un gusano parásito, impide que la linfa vuelva al torrente sanguíneo, el área afectada puede hincharse de forma masiva.

El sistema linfático transporta grasas del intestino delgado a la sangre

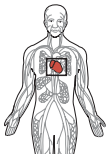
Después de una comida rica en grasas, partículas de grasa pueden constituir el 1 por ciento del líquido linfático. ¿A qué se debe esto? Como veremos en el capítulo 34, el intestino delgado está provisto con abundancia de capilares linfáticos. Después de absorber las grasas digeridas, las células intestinales liberan partículas de grasa hacia el líquido intersticial. Estas partículas son demasiado grandes para entrar por difusión en los capilares sanguíneos, pero no tienen problema para entrar por las aberturas entre las células de los capilares linfáticos. Una vez en la linfa, la grasa es transportada a las venas que salen de la vena cava superior, una vena grande que desemboca en el corazón.

El sistema linfático ayuda a defender al cuerpo contra las enfermedades

Además de sus otras funciones, el sistema linfático colabora en la defensa del cuerpo contra invasores como bacterias y virus. En los revestimientos de los tractos respiratorio, digestivo y urinario hay porciones de tejido conectivo que contienen un gran número de linfocitos. Las más grandes de esas porciones son las **tonsilas** o **amígdalas**, situadas en la cavidad detrás de la boca. Los vasos linfáticos son interrumpidos periódicamente por estructuras con forma de haba y de unos 2.5 centímetros de longitud, llamados **nodos** o **ganglios linfáticos** (véase la figura 32-17). La linfa tiene que pasar por espacios estrechos dentro de los ganglios, que contienen masas de macrófagos y linfocitos. Algunas infecciones provocan que los ganglios se inflamen conforme acumulan glóbulos blancos, bacterias, desechos de células muertas y líquido.

El timo y el bazo son órganos que forman parte del sistema linfático (véase la figura 32-17). El **timo** está situado bajo el esternón, un poco más arriba del corazón. El timo está muy activo en los bebés y niños pequeños, pero su tamaño e importancia disminuyen en el adulto. Algunos tipos de linfocitos inmaduros producidos en la médula ósea viajan en el torrente sanguíneo hacia el timo, donde maduran. El **bazo** está situado en la parte izquierda de la cavidad abdominal, entre el estómago y el diafragma. Así como los ganglios linfáticos filtran la linfa, el bazo filtra la sangre, exponiéndola a macrófagos y linfocitos que destruyen las partículas extrañas y los glóbulos rojos viejos.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO MUERTE SÚBITA



Es posible que Darryl Kile haya estado consciente del insidioso progreso de la aterosclerosis que lo amenazaba y que repentinamente le cobró la vida. Aunque las arterias coronarias extremadamente adelgazadas pueden provocar dolor en el pecho (*angina*) y advertir de un problema inminente, menos del 20 por ciento de los infartos al miocardio son causados sólo por la presencia de placa. La mayoría ocurre porque el recubrimiento fibroso que contiene la placa dentro de las paredes arteriales se rompe y estimula la formación de un coágulo dentro de la arteria (véase el recuadro en la fotografía que abre el capítulo). Esos coágulos pueden desprenderse repentinamente y ser transportados a una parte más estrecha de la arteria, donde bloquean por completo el flujo de sangre. En Estados Unidos unas 3000 personas jóvenes, entre 15 y 34 años, mueren de infartos al miocardio cada año. Algunos individuos presentan factores genéticos que contribuyen de manera excepcional a los altos niveles de colesterol LDL, la hipertensión y la aterosclerosis. Pero con cambios en el estilo de vida y la ayuda de medicamentos que reducen la presión arterial, el colesterol LDL y la inflamación, incluso personas con factores especiales de riesgo logran llevar una vida activa y larga, evitando una tragedia como la que ocurrió a Darryl Kile, a su familia, amigos y compañeros de equipo.

Piensa en esto ¿En tu familia existen factores de riesgo como colesterol alto (total y LDL), hipertensión o angina de pecho? ¿Alguna persona de tu familia inmediata murió prematuramente de alguna enfermedad cardiaca? ¡Nunca es demasiado pronto para averiguarlo! Incluso en ausencia de historia familiar, un examen físico completo que incluya un perfil de lípidos y un electrocardiograma te ayudará a evaluar tus propios riesgos y a emprender acciones que te permitan proteger la salud de tu sistema cardiovascular.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

32.1 ¿Qué características y funciones principales tienen los sistemas circulatorios?

Los sistemas circulatorios transportan sangre rica en nutrimentos disueltos y oxígeno a las inmediaciones de cada célula, donde liberan los nutrimentos y absorben los desechos por difusión. Todos los sistemas circulatorios tienen tres partes principales: sangre, que es un líquido; vasos, un sistema de canales para conducir la sangre; y un corazón, una bomba que hace circular la sangre. Los invertebrados tienen sistemas circulatorios cerrados o abiertos. En los sistemas abiertos, el corazón bombea sangre hacia un hemocele, donde baña directamente los órganos internos. Casi todos los vertebrados tienen sistemas cerrados, en los que la sangre queda confinada al corazón y los vasos sanguíneos.

Web tutorial 32.1 Sistemas circulatorios

32.2 ¿Cómo funciona el corazón de los vertebrados?

Los sistemas circulatorios de los vertebrados transportan gases, hormonas y desechos; distribuyen nutrimentos; ayudan a regular la temperatura del cuerpo y lo defienden contra las enfermedades.

El corazón de los vertebrados evolucionó desde uno de dos cavidades en los peces, a uno de tres en los anfibios y la mayoría de los reptiles, hasta uno de cuatro en las aves y los mamíferos. En el corazón de cuatro cavidades, la sangre se bombea por separado a los pulmones y al resto del cuerpo, manteniendo una separación completa de la sangre oxigenada y desoxigenada. La sangre desoxigenada se recibe del cuerpo en la aurícula derecha y se pasa al ventrículo derecho, el cual la bombea a los pulmones. La sangre oxigenada de los pulmones entra en la aurícula izquierda, pasa al ventrículo izquierdo y se bombea al resto del cuerpo.

El ciclo cardiaco consta de dos etapas: **1.** contracción auricular seguida de **2.** contracción ventricular. La dirección del flujo de la sangre se mantiene mediante válvulas dentro del corazón. El nodo sinoauricular, que es el marcapasos del corazón, inicia y coordina las contracciones. El sistema nervioso y las hormonas, como la epinefrina, pueden modificar el ritmo cardiaco.

Web tutorial 32.2 Corazones de dos cavidades

Web tutorial 32.3 Corazones de tres cavidades

Web tutorial 32.4 El sistema cardiovascular humano

32.3 ¿Qué es la sangre?

La sangre está constituida de líquido y componentes celulares. El líquido, llamado plasma, consiste en agua que contiene proteínas, hormonas, nutrimentos, gases y desechos. Los glóbulos rojos o eritrocitos contienen una proteína grande llamada hemoglobina que es rica en hierro y transporta oxígeno. La hormona eritropoyetina regula el número de eritrocitos. Hay cinco tipos de glóbulos blancos, o leucocitos, que combaten las infecciones. Las plaquetas, que son fragmentos de megacariocitos, son importantes para la coagulación de la sangre.

32.4 ¿Qué tipos de vasos sanguíneos hay y qué funciones tienen?

La sangre que sale del corazón viaja por arterias, arteriolas, capilares, vénulas, venas y regresa luego al corazón (en ese orden). Cada vaso está especializado para desempeñar su función. Las arterias, elásticas y musculares, ayudan a bombear la sangre. Los capilares, de paredes delgadas, intercambian materiales entre las células del cuerpo y la sangre. Las venas ofrecen un camino de baja resistencia para regresar al corazón y tienen válvulas unidireccionales que mantienen la dirección del flujo de la sangre. La distribución de la sangre se regula mediante la constricción y dilatación de las arteriolas por la influencia del sistema nervioso simpático y factores locales como la cantidad de dióxido de carbono en los tejidos. Factores locales regulan también a los esfínteres precapilares, que controlan el flujo de sangre a los capilares.

32.5 ¿Cómo colabora el sistema linfático con el circulatorio?

El sistema linfático humano consta de vasos linfáticos, tonsilas o amígdalas, ganglios linfáticos, timo y bazo. El sistema linfático elimina el exceso de líquido intersticial que se filtra por las paredes de los capilares sanguíneos. Transporta grasas al torrente sanguíneo desde el intestino delgado y combate infecciones filtrando la linfa a través de los ganglios linfáticos, donde glóbulos blancos ingieren a invasores como virus y bacterias. El timo, que es más activo en los niños pequeños, produce linfocitos que intervienen en la inmunidad. El bazo filtra sangre haciéndola pasar por macrófagos y linfocitos, que eliminan bacterias y células sanguíneas dañadas.

TÉRMINOS CLAVE

accidente cerebrovascular *pág. 654*
angina de pecho *pág. 654*
arteria *pág. 652*
arteriola *pág. 661*
aterosclerosis *pág. 654*
aurícula *pág. 651*
bazo *pág. 665*
capilar *pág. 661*
ciclo cardiaco *pág. 653*
coagulación de la sangre *pág. 659*
corazón *pág. 650*
eritrocito *pág. 658*
eritropoyetina *pág. 659*
esfínter precapilar *pág. 663*
fibras de Purkinje *pág. 657*
fibrina *pág. 659*
fibrinógeno *pág. 659*
ganglio linfático *pág. 665*
hemocele *pág. 650*
hemoglobina *pág. 658*
hipertensión *pág. 656*
infarto al miocardio *pág. 654*
leucocito *pág. 659*
linfa *pág. 664*
linfocito *pág. 659*
líquido intersticial *pág. 662*
macrófago *pág. 659*
marcapasos *pág. 656*
músculo cardiaco *pág. 653*
nodo auriculoventricular (AV) *pág. 657*
nodo sinoauricular (SA) *pág. 656*
placa *pág. 654*
plaqueta *pág. 659*
plasma *pág. 657*
sangre *pág. 650*
sistema circulatorio abierto *pág. 650*
sistema circulatorio cerrado *pág. 650*
sistema linfático *pág. 663*
timo *pág. 665*
tonsila *pág. 665*
trombina *pág. 659*
válvula auriculoventricular *pág. 656*
válvula semilunar *pág. 656*
vaso sanguíneo *pág. 650*
vena *pág. 652*
vénula *pág. 662*
ventrículo *pág. 651*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Traza el flujo de sangre por el sistema circulatorio, partiendo de la aurícula derecha y volviendo a ella.
2. Cita tres tipos de células sanguíneas y describe sus funciones principales.
3. Menciona cinco funciones del sistema circulatorio de los vertebrados.
4. ¿En qué se parecen las venas y los vasos linfáticos? Describe el transporte de líquidos en cada caso.
5. Describe tres funciones importantes del sistema linfático.
6. Distingue entre plasma, líquido intersticial y linfa.
7. Describe las venas, los capilares y las arterias, señalando sus similitudes y diferencias.
8. Traza la evolución del corazón de los vertebrados, desde el de dos cavidades hasta el de cuatro.
9. Explica detalladamente qué hace latir al corazón de los vertebrados.
10. Describe el ciclo cardiaco y relaciona las contracciones de las aurículas y los ventrículos con las dos lecturas que se toman al medir la presión arterial.
11. Explica cómo un sistema de retroalimentación negativa regula el número de glóbulos rojos.
12. Describe la formación de una placa aterosclerótica. ¿Qué riesgos están asociados con la aterosclerosis?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Comenta qué puedes hacer ahora y en el futuro para reducir el riesgo de padecer una enfermedad cardiaca.
2. Considerando lo comunes que son las enfermedades cardiacas y el elevado y cada vez más alto costo de tratarlas, ciertos tratamientos podrían no estar al alcance de todos a quienes podrían beneficiar. ¿Qué factores tomarías en cuenta al racionar los procedimientos cardiovasculares, como los trasplantes de corazón o la cirugía de derivación coronaria o *bypass*?
3. José, un ejecutivo de 45 años de edad en una importante corporación, trabaja 60 horas a la semana; cuando juega básquetbol con su hijo durante los fines de semana, siente dolor en el pecho. ¿Qué tratamientos o cambios en el estilo de vida podría recomendarle su médico? Si la angina de pecho de José se agrava, ¿qué tratamientos podría prescribirle el médico? Explica cómo funcionaría cada opción.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Aldhous, P. "Print Me a Heart and a Set of Arteries". *New Scientist*, 15 de abril de 2006. Utilizando un dispositivo que parece una impresora de inyección, los bioingenieros están "imprimiendo" células en delgadas capas sobre una base de gel, donde comienzan a comportarse como un órgano real.

Ditlea, S. "The Trials of an Artificial Heart". *Scientific American*, julio de 2002. Describe los trabajos y los ensayos clínicos de corazones artificiales y otros dispositivos puente; incluye una discusión en torno a consideraciones éticas.

Fox, C. "Can Stem Cells Save Dying Hearts?" *Discover*, septiembre de 2005. Han comenzado los ensayos para inyectar en los corazones enfermos células madre de la médula ósea de los propios pacientes.

Gibbons, R. *et al*. "Waiting for Organ Transplantation". *Science*, 14 de enero de 2000. Estadísticas acerca de la necesidad, disponibilidad y tiempo de espera para el trasplante de órganos sugieren que es indispensable recurrir a nuevas fuentes de órganos.

Jain, R. K. y Carmeliet, P. F. "Vessels of Death of Life". *Scientific American*, diciembre de 2001. Aprendiendo a manipular la angiogénesis (la formación de vasos sanguíneos), los investigadores podrían encontrar formas de desintegrar tumores o de llevar más sangre al corazón.

Libby, A. "Atherosclerosis: The New View". *Scientific American*, mayo de 2002. Una descripción bellamente ilustrada de la formación de placa con un énfasis en el papel de la inflamación en las enfermedades cardiacas.

Martindale, D. "Reactive Reasoning". *Scientific American*, abril de 2005. Un compuesto en la sangre llamado proteína C reactiva podría ser esencial en la inflamación que desencadena la formación de placa aterosclerótica.

Wang, L. "Blood Relatives". *Science News*, 31 de marzo de 2001. Describe una variedad de enfoques y problemas al fabricar sangre artificial, así como las posibilidades en el futuro cercano.

CAPÍTULO 33

Respiración

Estos estudiantes dicen que dejarán de fumar más adelante.
Sólo una de cada tres personas que afirman esto tendrá éxito.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Vidas que se esfuman

33.1 ¿Por qué es necesario el intercambio de gases?

33.2 ¿Cuáles son algunas de las adaptaciones evolutivas que permiten el intercambio de gases?

- Algunos animales de ambientes húmedos carecen de estructuras respiratorias especializadas
- Los sistemas respiratorios facilitan el intercambio de gases por difusión
- Las branquias facilitan el intercambio de gases en ambientes acuáticos
- Los animales terrestres tienen estructuras respiratorias internas

De cerca: Las branquias y los gases: un intercambio contracorriente

33.3 ¿Cómo funciona el aparato respiratorio humano?

- La porción conductora del aparato respiratorio lleva aire a los pulmones
- El intercambio de gases se efectúa en los alveolos
- El oxígeno y el dióxido de carbono son transportados por mecanismos distintos

Guardián de la salud: Fumar: una decisión de vida

Enlaces con la vida: Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores

- El aire se inhala activamente y se exhala pasivamente
- El centro respiratorio del cerebro controla la frecuencia respiratoria

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Vidas que se esfuman

ESTUDIO DE CASO VIDAS QUE SE ESFUMAN

LOS ESTUDIANTES SE REÚNEN afuera de los edificios de la universidad, encendiendo cigarrillos entre una clase y otra. Algunas toses se intercalan entre su conversación. Al igual que la mayoría de los adultos fumadores, muchos de estos estudiantes adquirieron el hábito en la preparatoria. "Comencé como un fumador social en la preparatoria", dice un estudiante de primer año en la Universidad de Illinois citado en el periódico estudiantil. "Después, me volví adicto. Pero me gusta. Me gusta fumar y no me preocupan los efectos perjudiciales". Esta universidad, donde aproximadamente el 30 por ciento de los estudiantes fumaron tabaco durante el mes anterior, está registrando un incremento en el porcentaje de alumnos que fuman. De acuerdo con John Kirkwood, presidente de la Asociación Neumológica de Estados Unidos, cada día más de 4000 chicos de ese país menores de 18 años encienden su primer cigarrillo. Para muchos de ellos, éste es el comienzo de una lucha contra la adicción que durará toda la vida. De acuerdo con los Centros para el Control de Enfermedades, aproximadamente el 22 por ciento de los estudiantes de nivel medio superior fuman tabaco, aunque menos del 10 por ciento son fumadores frecuentes. Según las estadísticas, los fumadores jóvenes sufren infecciones respiratorias más severas y con mayor frecuencia que quienes no fuman, y el tabaquismo provoca retraso en el crecimiento de sus pulmones. La mayoría de los estudiantes están conscientes de los peligros que esto implica, pero afirman que dejarán de fumar "con el paso del tiempo". ¿Estos fumadores tendrán probabilidad de abandonar el hábito de fumar? ¿Cuáles son sus probabilidades de morir a causa del tabaquismo? ¿Cómo interfiere el hábito de fumar con el aparato respiratorio desde los bronquios hasta el torrente sanguíneo?

33.1 ¿POR QUÉ ES NECESARIO EL INTERCAMBIO DE GASES?

¡Otra vez tarde! Al subir las escaleras de dos en dos peldaños para llegar al salón, sientes que te "arden" las pantorrillas. Recordando el capítulo 8, piensas: "¡Ah! Es la acumulación de ácido láctico: mis células musculares están fermentando glucosa porque no obtienen suficiente oxígeno para efectuar la respiración celular". Al sentarte, tratando de no jadear demasiado y sintiendo los fuertes latidos del corazón, el malestar disminuye. El menor esfuerzo, aunado a una respiración rápida, garantiza un abasto adecuado de oxígeno (O_2); el ácido láctico se vuelve a convertir en piruvato y luego se descompone en dióxido de carbono (CO_2) y agua, al tiempo que suministra energía adicional.

Estás experimentando en carne propia la relación entre la respiración celular y la inhalación de aire, que también se llama *respiración*. Cada célula del cuerpo (de todos los organismos) debe gastar continuamente energía para mantenerse. Cuando pedimos a nuestros músculos que nos suban rápidamente por las escaleras, la demanda es extrema. La respiración celular convierte la energía de nutrimentos (como el azúcar) en ATP que las células del cuerpo pueden usar, pero el proceso requiere un abasto continuo de oxígeno y genera dióxido de carbono como desecho. El rápido latir del corazón durante el relajamiento después de subir corriendo las escaleras es un recordatorio de que el sistema circulatorio funciona en estrecha armonía con el aparato respiratorio: extrae oxígeno del aire de los pulmones, lo lleva cerca de las células para que pueda difundirse y capta dióxido de carbono para liberarlo en los pulmones.

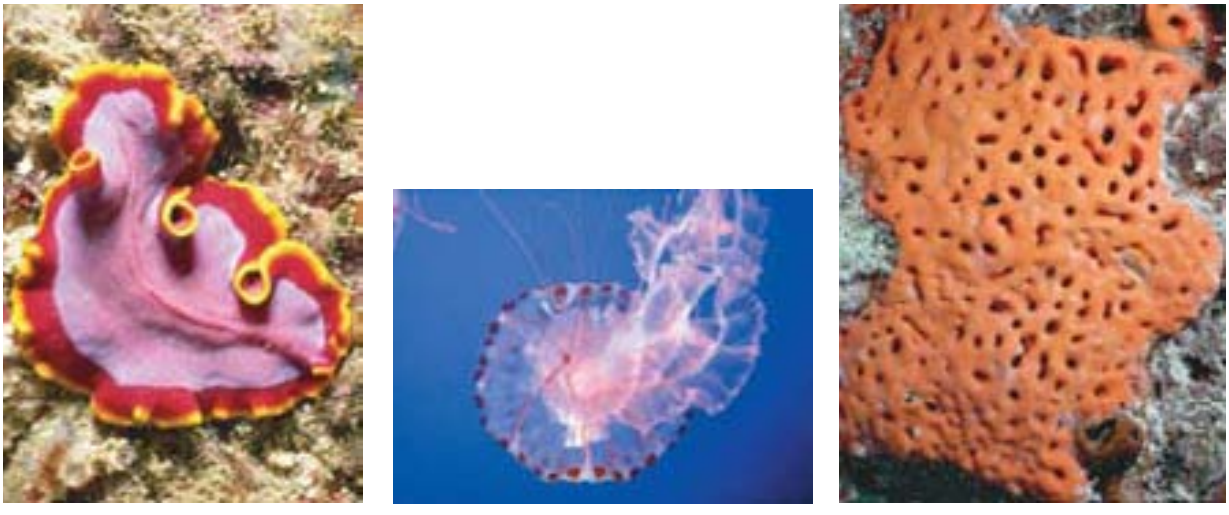
¿Cómo es que la inhalación de aire contribuye a la respiración celular? ¿Qué aspecto tiene el interior de un pulmón y qué adaptaciones tiene para el intercambio de gases? ¿Por qué los pulmones están dentro de nuestro cuerpo y no afuera, donde estarían expuestos al aire de manera directa? ¿Cómo respiran los animales acuáticos? En este capítulo exploraremos las estructuras especializadas de los diversos sistemas respiratorios y su funcionamiento.

33.2 ¿CUÁLES SON ALGUNAS DE LAS ADAPTACIONES EVOLUTIVAS QUE PERMITEN EL INTERCAMBIO DE GASES?

En última instancia, el intercambio de gases en todos los organismos se basa en la difusión. La respiración celular agota el O_2 y eleva los niveles de CO_2, creando gradientes de concentración que favorecen la difusión del dióxido de carbono hacia fuera de las células y del oxígeno hacia su interior. Aunque los sistemas respiratorios de los animales son asombrosamente diversos, todos tienen tres características en común que facilitan la difusión:

- La superficie respiratoria debe mantenerse húmeda, porque los gases deben estar disueltos en agua cuando se difunden hacia dentro o hacia fuera de las células.
- Las células que revisten las superficies respiratorias son muy delgadas, lo que facilita la difusión de gases a través de ellas.
- El sistema respiratorio debe tener una área superficial extensa en contacto con el entorno para que el intercambio de gases sea adecuado.

En los siguientes apartados examinaremos diversos sistemas respiratorios de los animales que han sido moldeados por el ambiente en el que evolucionaron.



a) Platelminto **b) Medusa** **c) Esponja**

FIGURA 33-1 Algunos animales carecen de estructuras respiratorias especializadas
Casi todos los animales que carecen de un aparato respiratorio tienen una demanda metabólica baja y una superficie corporal extensa y húmeda. ***a)*** El cuerpo aplanado de este platelminto marino intercambia gases con el agua. ***b)*** Las células del cuerpo con forma de campana de una medusa tienen una tasa metabólica baja y el agua de mar que entra y sale de la campana al nadar permite un intercambio adecuado de gases. ***c)*** Células flageladas hacen pasar corrientes de agua por numerosas aberturas del cuerpo de la esponja. Esas corrientes llevan partículas alimenticias microscópicas y permiten que las células intercambien gases con el agua.

Algunos animales de ambientes húmedos carecen de estructuras respiratorias especializadas

En el caso de algunos animales que viven en ambientes húmedos, el exterior de su cuerpo, cubierto con una piel delgada y permeable a los gases, presenta una área lo bastante extensa como para que los gases se difundan. Si el cuerpo es muy pequeño y alargado, como en los gusanos nemátodos microscópicos, los gases sólo tienen que difundirse una distancia corta para llegar a todas las células del cuerpo. O bien, el cuerpo del animal podría ser delgado y aplanado, como en los gusanos platelmintos, donde la mayoría de las células están cerca de la piel húmeda a través de la cual los gases se difunden (**FIGURA 33-1a**).

Si la demanda energética es lo bastante baja, la proporción relativamente lenta de intercambio de gases por difusión podría ser suficiente, incluso para cuerpos más grandes y gruesos. Por ejemplo, las medusas pueden ser muy grandes, pero las células que están lejos de la superficie son relativamente inertes y requieren poco oxígeno (**FIGURA 33-1b**).

Otra adaptación para el intercambio de gases consiste en llevar el ambiente acuoso a las inmediaciones de todas las células del cuerpo. Las esponjas, por ejemplo, hacen circular el agua de mar a través de canales dentro de su cuerpo (**FIGURA 33-1c**).

Algunos animales combinan una superficie de piel extensa, a través de la cual hay difusión, con un sistema circulatorio bien desarrollado. Por ejemplo, en la lombriz de tierra los gases se difunden a través de la húmeda piel y se distribuyen por todo el cuerpo mediante un sistema circulatorio eficiente (véase la figura 32-1b). La sangre de los capilares cutáneos se lleva rápidamente el oxígeno que se difundió a través de la piel y mantiene un gradiente de concentración que favorece la difusión del oxígeno hacia el interior. La forma alargada del gusano garantiza que la superficie de la piel sea más grande en relación con su volumen interno. Este sistema es muy efectivo, ya que el lento metabolismo del animal requiere relativamente poco oxígeno. La piel debe mantenerse húmeda para seguir siendo eficaz como órgano de intercambio de gases; una lombriz con la piel seca se asfixiaría.

Los sistemas respiratorios facilitan el intercambio de gases por difusión

Casi todos los animales han desarrollado sistemas respiratorios especializados que entran en contacto íntimo con su sistema circulatorio para intercambiar gases entre las células y el entorno. La transferencia de gases del entorno a la sangre y de ahí a las células, y de regreso, normalmente se efectúa en etapas que alternan el flujo masivo con la difusión. Durante el **flujo masivo**, líquidos o gases se mueven en gran cantidad a través de espacios relativamente grandes, desde áreas con mayor presión hacia áreas de menor presión. El flujo masivo difiere de la difusión, en la cual las moléculas se mueven individualmente de áreas de alta concentración a áreas de baja concentración (véase el capítulo 5). En los animales con sistemas respiratorios bien desarrollados —que van desde los insectos hasta los seres humanos—, el intercambio gaseoso en los sistemas respiratorios se lleva a cabo en las siguientes etapas ilustradas para el caso de los mamíferos en la **FIGURA 33-2**.

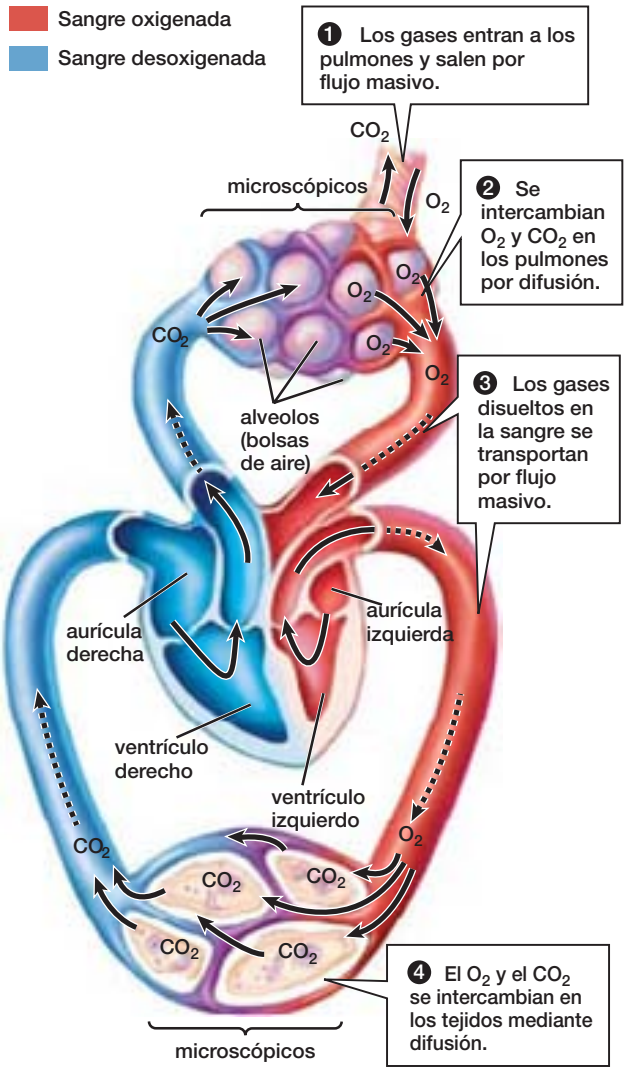


FIGURA 33-2 Descripción general del intercambio de gases tomando un mamífero como modelo

1. Aire o agua, con alto contenido de O_2 y bajo contenido de CO_2, pasa a través de una superficie respiratoria mediante flujo masivo, lo que comúnmente se facilita con movimientos musculares de respiración.
2. El O_2 y CO_2 se intercambian a través de la superficie respiratoria de los pulmones mediante difusión; el oxígeno se lleva a los capilares del sistema circulatorio y el dióxido de carbono se extrae de la sangre.
3. Se transportan gases entre el sistema circulatorio y los tejidos por flujo masivo de sangre y son bombeados por todo el cuerpo mediante la actividad cardiaca.
4. Se intercambian gases entre los tejidos y el sistema circulatorio por difusión. En los tejidos, el O_2 se difunde de los capilares hacia los tejidos circundantes; el CO_2 se difunde de los tejidos al interior de los capilares, de acuerdo con sus gradientes de concentración.

FIGURA 33-3 Branquias externas en un molusco

Las branquias facilitan el intercambio de gases en ambientes acuáticos

Las **branquias** o agallas son las estructuras respiratorias de muchos animales acuáticos. El tipo más sencillo de branquia, presente en ciertos anfibios (véase la figura 33-5a) y moluscos nudibranquios (literalmente, "branquias desnudas") (**FIGURA 33-3**), consiste en numerosas proyecciones de la superficie corporal hacia el agua circundante. En general, las branquias tienen complejas ramificaciones o pliegues que aumentan al máximo su área superficial. En algunos animales, el tamaño de las branquias depende de la disponibilidad de oxígeno en el agua circundante. Por ejemplo, las salamandras que viven en agua estancada (la cual tiene poca oportunidad de mezclarse con aire) tienen branquias más grandes que las que viven en agua bien aireada. Las branquias tienen una densa red de capilares inmediatamente abajo de sus delicadas membranas exteriores. Estos capilares acercan la sangre a la superficie, donde se intercambian gases.

El cuerpo de los peces protege sus delicadas membranas branquiales debajo de una tapa ósea protectora, el *opérculo*. Los peces crean una corriente continua sobre sus branquias bombeando agua por la boca y expulsándola por el opérculo justo detrás de las branquias (véase la figura E33-2 en la sección "De cerca"). Los peces pueden aumentar el flujo de agua nadando con la boca abierta; algunos nadadores rápidos, como la caballa, el atún y algunos tiburones (pero no todos), dependen considerablemente del nado para ventilar sus branquias. Los peces enfrentan un desafío al extraer el oxígeno del agua. Mientras que el oxígeno constituye aproximadamente el 21 por ciento del aire, en el agua constituye menos del 1 por ciento. Como el agua es unas 800 veces más densa que el aire, bombear el agua a través de las branquias consume mucha más energía que la inhalación de aire. Los peces han desarrollado un método muy eficiente, llamado *intercambio contracorriente*, para intercambiar los gases con el agua. Dentro de las branquias, el agua y el flujo sanguíneo fluyen en direcciones opuestas y mantienen relativamente constantes los gradientes de concentración, como se describe en "De cerca: Las branquias y los gases: un intercambio contracorriente".

Los animales terrestres tienen estructuras respiratorias internas

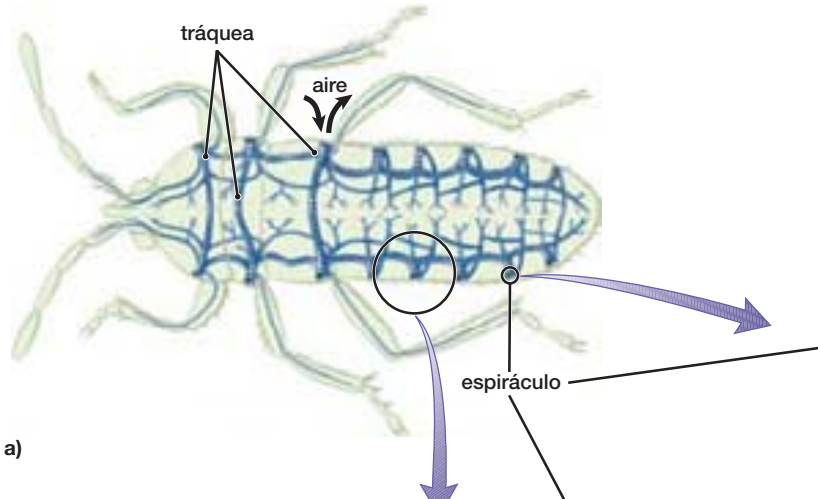
necesitan permanecer húmedas. Por ello, conforme los animales hicieron la transición del agua a la tierra seca a lo largo del tiempo evolutivo, fue necesario que desarrollaran estructuras respiratorias cuyas membranas superficiales delgadas estuvieran protegidas, sostenidas y cubiertas por una película de agua. La selección natural produjo una variedad de tales estructuras, incluyendo las tráqueas de los insectos y los pulmones de los vertebrados.

Los insectos respiran mediante tráqueas

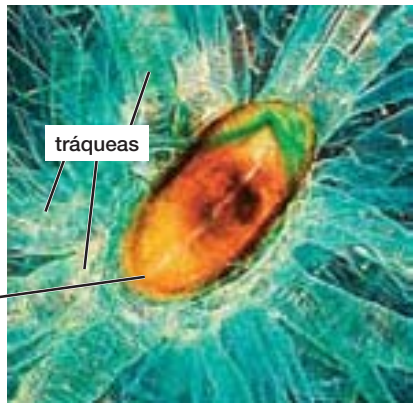
Los insectos emplean un sistema de tubos internos muy ramificados llamados **tráqueas**, que llevan aire directamente a todo el cuerpo (**FIGURA 33-4a**). Las tráqueas, reforzadas con quitina (que también confiere dureza al esqueleto externo del insecto), penetran en los tejidos del cuerpo (**FIGURA 33-4b**) y se ramifican para formar canales microscópicos llamados *traqueolas*, las cuales permiten el intercambio de gases a través de sus terminaciones llenas de líquido (**FIGURA 33-4c**). Cada célula del cuerpo está cerca de una traqueola, lo que reduce al mínimo las distancias de difusión. El aire entra en las tráqueas y sale de ellas a través de una serie de aberturas llamadas **espiráculos**, situadas a los costados del abdomen. Los espiráculos tienen válvulas que permiten su apertura o cierre. Algunos insectos grandes utilizan movimientos musculares de bombeo en el abdomen para acelerar el movimiento de aire a través de las tráqueas.

Casi todos los vertebrados terrestres respiran por medio de pulmones

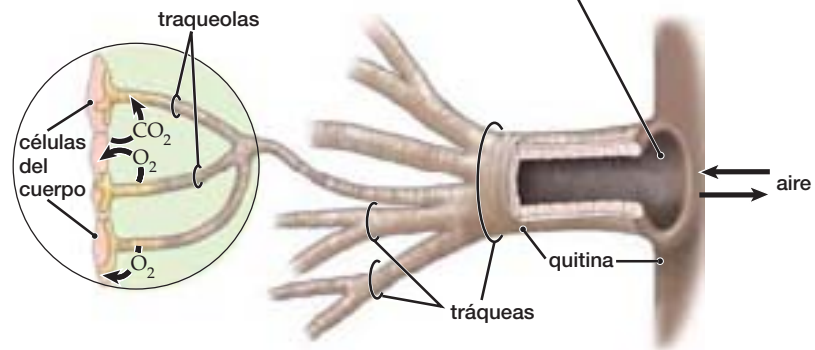
Los **pulmones** son cámaras que contienen superficies respiratorias húmedas protegidas dentro del cuerpo, donde se reduce al mínimo la pérdida de agua, en tanto que la pared corporal brinda sostén. El primer pulmón de un vertebrado probablemente apareció en un pez de agua dulce y consistió en una evaginación del tracto digestivo. El intercambio de gases en este sencillo pulmón ayudaba al pez a sobrevivir en agua estancada, escasa en oxígeno. Los anfibios, que ocupan la frontera entre la vida acuática y terrestre, utilizan branquias en la etapa larvaria y pulmones en la forma adulta, más terrestre. Por ejemplo, el renacuajo, totalmente acuático, cambia sus branquias por pulmones al convertirse en una rana, que es más terrestre (**FIGURAS 33-5a, b**). Las ranas y las salamandras utilizan su piel húmeda como superficie respiratoria complementaria.



a)



b)



c)

FIGURA 33-4 Los insectos respiran por tráqueas
a) Las tráqueas de los insectos, como este escarabajo, se ramifican profusamente por todo el cuerpo; el aire entra y sale a través de los espiráculos en la pared corporal. ***b)*** Esta imagen bajo el microscopio muestra las tráqueas (en azul) que se ramifican hacia fuera del espiráculo (café). ***c)*** Una amplificación muestra las tráqueas, reforzadas con fibras de quitina, que se ramifican y desembocan en traqueolas microscópicas. En los extremos llenos de líquido (amarillo) de las traqueolas, ocurre el intercambio de gases con células individuales en el cuerpo del insecto. PREGUNTA: ¿Por qué los órganos respiratorios de un insecto (sus tráqueas) son tan numerosos en comparación con los órganos respiratorios de un mamífero o un ave (los pulmones)?

Las escamas de los reptiles (**FIGURA 33-5c**) reducen la pérdida de agua a través de la piel y permiten al animal sobrevivir en lugares secos. Sin embargo, las escamas también reducen la difusión de gases a través de la piel, por lo que los pulmones de los reptiles están mejor desarrollados que los de los anfibios.

a)

b)

c)

FIGURA 33-5 Los batracios y reptiles tienen diferentes adaptaciones respiratorias
a) La rana toro, un anfibio, inicia la vida como renacuajo totalmente acuático, con branquias externas plumosas que después quedarán encerradas en una cámara protectora. ***b)*** Durante la metamorfosis para convertirse en una rana adulta que respira aire, las branquias se pierden y son remplazadas por pulmones sencillos con forma de bolsa. Tanto en el renacuajo como en la rana, también hay intercambio de gases por difusión a través de la piel, la cual debe mantenerse húmeda para funcionar como superficie respiratoria. ***c)*** Los reptiles adaptados a la vida terrestre, como esta serpiente, están cubiertos de escamas que restringen el intercambio de gases a través de la piel. Para compensar esta pérdida, los pulmones de los reptiles son más eficientes que los de los anfibios. PREGUNTA: ¿Cómo influyen las adaptaciones respiratorias de los anfibios en la variedad de hábitat en los que viven estos animales?

Durante el **intercambio contracorriente**, los líquidos que difieren en alguna propiedad (como temperatura o concentración de una sustancia disuelta) fluyen uno a lo largo del otro en direcciones opuestas. Durante el *flujo contracorriente*, se transfiere algo de calor o soluto del líquido con una mayor cantidad al que tiene menor cantidad. El intercambio contracorriente ayuda a reducir la pérdida de calor de las extremidades de los vertebrados, a reabsorber agua en los riñones y a maximizar el intercambio de gases en las branquias. Cuando los líquidos fluyen en direcciones opuestas, esto mantiene un gradiente de concentración de la sustancia disuelta de un líquido al otro en una distancia relativamente grande, lo que promueve la máxima difusión. La **FIGURA E33-1a** muestra el *intercambio concurrente*, en el que dos líquidos fluyen en la misma dirección. Aunque el gradiente inicial es grande, los dos líquidos finalmente adquieren iguales concentraciones del soluto (en color rojo), eliminando el gradiente de difusión. En contraste, el intercambio contracorriente (**FIGURA E33-1b**) mantiene un gradiente y da por resultado una transferencia mucho mayor del soluto.

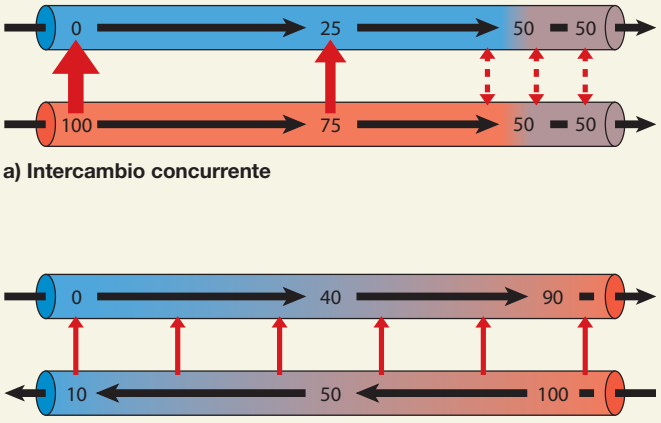


FIGURA E33-1 Intercambio concurrente versus contracorriente

Las branquias de los peces utilizan el intercambio contracorriente como un mecanismo eficiente para transferir el oxígeno del agua que fluye por ellas hacia los capilares de las branquias (**FIGURA E33-2a**). Las branquias de los peces consisten en una serie de filamentos (**FIGURA E33-2b**). Cada filamento se nutre por un vaso sanguíneo de entrada que transporta sangre desoxigenada y un vaso de salida que contiene sangre oxigenada; cada filamento está cubierto con delgados pliegues de tejido, llamados *laminillas*. La sangre fluye en los capilares a través de cada laminilla del vaso de entrada al de salida, mientras que el agua fluye a través de los filamentos y de las laminillas en la dirección opuesta (**FIGURA E33-2c**). Durante su tránsito a través de las laminillas, la sangre de los capilares recoge el oxígeno (y libera el dióxido de carbono) en la contracorriente de agua. Como se ilustra en las figuras E33-1 y E33-2c, el agua y la sangre mantienen un gradiente de concentración de gases aproximadamente igual conforme pasan de una a otra. De esta forma, aunque el agua más oxigenada encuentra la sangre más oxigenada, esta configuración mantiene un gradiente de concentración constante que favorece la difusión de oxígeno del agua hacia la sangre (y de dióxido de carbono de la sangre hacia el agua) en todo el trayecto a través de la laminilla. El intercambio contracorriente es tan eficiente que algunos peces logran extraer el 85 por ciento del oxígeno del agua que fluye por sus branquias.

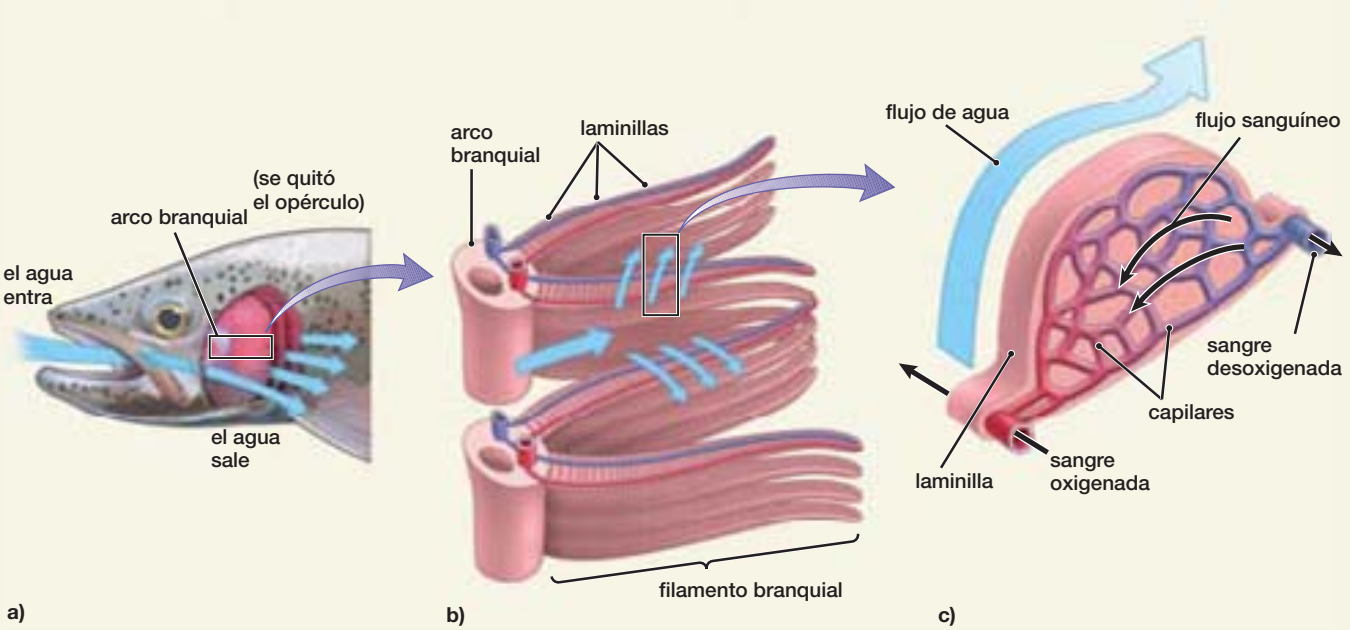


FIGURA E33-2 Las branquias intercambian gases con el agua

Los peces bombean agua que entra por su boca y sale por sus branquias. ***b)*** El agua fluye por una densa capa de filamentos dispuestos en pares adheridos a los arcos óseos branquiales. ***c)*** Las laminillas se proyectan desde cada filamento branquial. El agua fluye por encima de las laminillas en la dirección opuesta a la del flujo sanguíneo que circula por su red capilar.

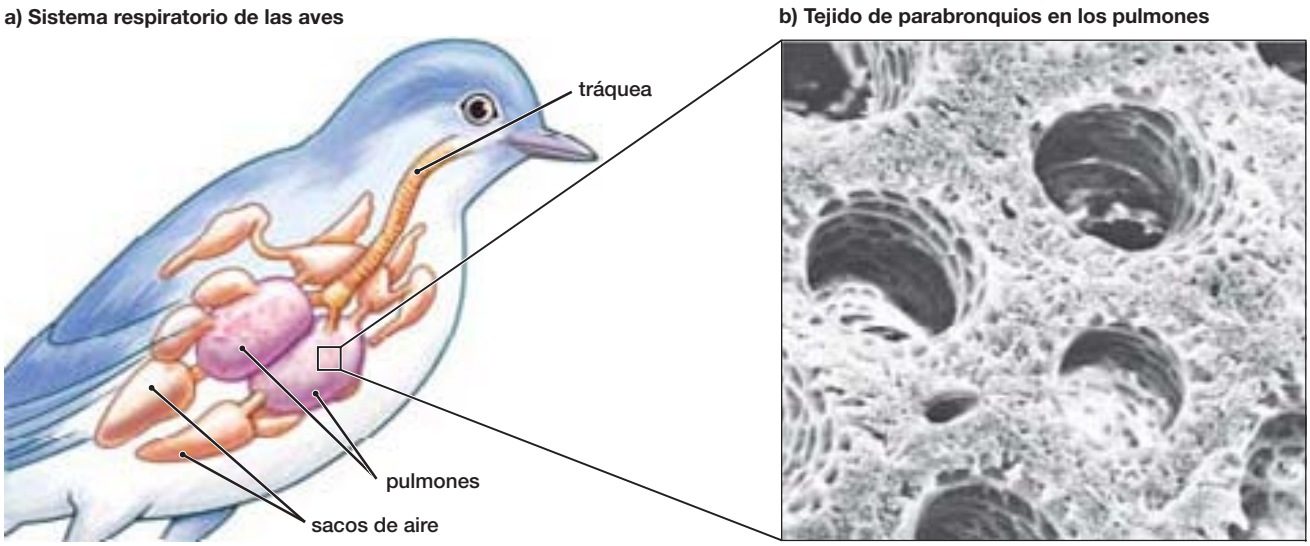


FIGURA 33-6 El sistema respiratorio de las aves es sumamente eficiente
a) Además de los pulmones, las aves poseen bolsas de aire que les permiten un intercambio más eficiente de gases. ***b)*** En las aves existen órganos tubulares para el intercambio de gases, llamados *parabronquios*, que permiten que el aire fluya, a través de los pulmones, hacia las bolsas de aire y de regreso. El aire fluye a través de canales con el extremo abierto; la región porosa entre los canales está llena de capilares y espacios de aire donde ocurre el intercambio gaseoso.

Todas las aves y los mamíferos respiran por medio de pulmones. Los pulmones de las aves han desarrollado adaptaciones que hacen posible un intercambio extremadamente eficiente de gases (FIGURA 33-6), lo cual es necesario para satisfacer la enorme demanda de energía del vuelo, a veces a miles de metros de altitud, donde escasea el oxígeno. En contraste con otros pulmones de vertebrados, que semejan bolsas, los de las aves están llenos de tubos huecos, con paredes delgadas, llamados *parabronquios*, que permiten el paso del aire en ambas direcciones (figura 33-6b). Las aves también se diferencian de otros vertebrados en que utilizan de siete a nueve sacos flexibles de aire como fuelles para bombear el aire hacia dentro y hacia fuera. Cuando un ave inhala, hace pasar aire por los pulmones, donde se extrae oxígeno; simultáneamente introduce aire en bolsas, algunas de las cuales están situadas más allá de los pulmones (figura 33-6a). Al exhalar, el aire oxigenado de las bolsas pasa otra vez por los pulmones, lo que permite al ave extraer oxígeno incluso al exhalar.

33.3 ¿CÓMO FUNCIONA EL APARATO RESPIRATORIO HUMANO?

El aparato respiratorio de los seres humanos y otros vertebrados pulmonados se puede dividir en dos partes: la **porción conductora** y la **porción de intercambio gaseoso**. La porción conductora consiste en una serie de conductos que transportan aire hacia y desde la parte de intercambio gaseoso, donde se intercambian gases con la sangre en bolsas diminutas dentro de los pulmones.

La porción conductora del aparato respiratorio lleva aire a los pulmones

la nariz o la boca, atraviesa la cavidad nasal u oral hasta llegar a una cámara común, la **faringe**, y luego viaja por la **laringe**, la "caja de sonido" u órgano de fonación (FIGURA 33-7). La abertura a la laringe está protegida por la *epiglotis*, un pliegue de tejido sustentado por cartílago. Durante la respiración normal, la epiglotis está inclinada hacia arriba, como se aprecia en la figura 33-7, y permite el libre flujo de aire a la laringe. Durante la deglución, la epiglotis se inclina hacia abajo y tapa la laringe, dirigiendo las sustancias al esófago. Si una persona trata de inhalar y tragar al mismo tiempo, este reflejo podría fallar y el alimento podría atorarse en la laringe e impedir el paso de aire a los pulmones. ¿Qué debemos hacer, si vemos que esto sucede? La *maniobra de Heimlich* (FIGURA 33-8) es fácil de efectuar y ha salvado incontables vidas.

Dentro de la laringe están las **cuerdas vocales**, bandas de tejido elástico controladas por músculos. Las contracciones musculares pueden hacer que las cuerdas vocales obstruyan parcialmente la abertura dentro de la laringe. El aire exhalado hace que vibren y produzcan los sonidos del habla o el canto. El tono de los sonidos se altera estirando las cuerdas y las palabras se articulan con movimientos de la lengua y los labios.

Después de la laringe, el aire inhalado pasa a la **tráquea**, un tubo flexible cuyas paredes están reforzadas con bandas semicirculares de cartílago rígido. Dentro del tórax, la tráquea se divide en dos ramas grandes llamadas **bronquios**, una para cada pulmón. Dentro del pulmón, el bronquio se ramifica una y otra vez en tubos cada vez más pequeños llamados **bronquiolos**. Los bronquiolos terminan en los microscópicos **alveolos**

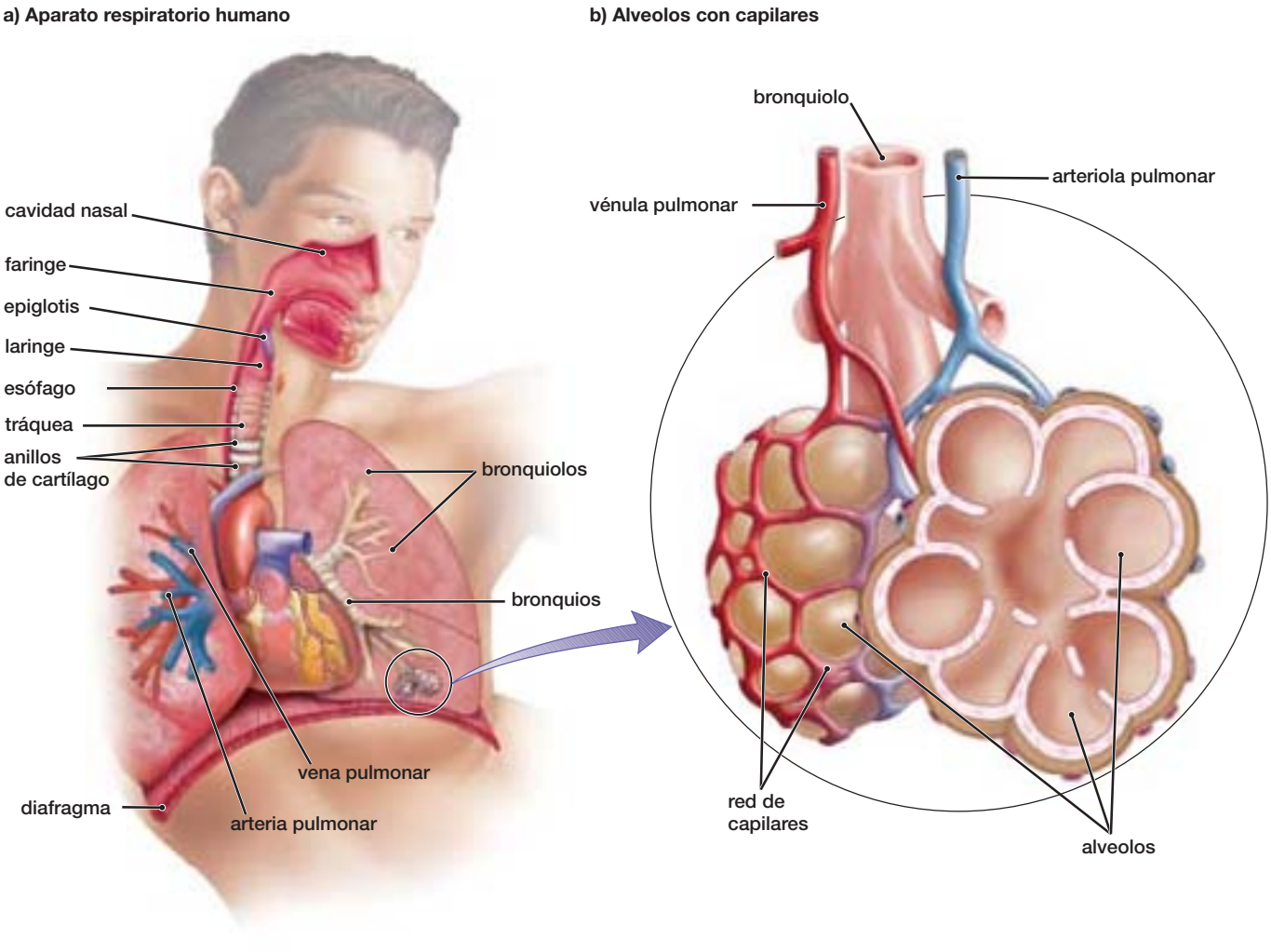


FIGURA 33-7 El aparato respiratorio humano

El aire entra principalmente por la cavidad nasal y la boca y pasa a través de la faringe y la laringe hacia la tráquea. La epiglotis impide que entren alimentos a la tráquea, la cual se divide en dos ramas grandes, los bronquios, que conducen a los dos pulmones. Las ramas más pequeñas de los bronquios, los bronquiolos, conducen el aire a los alveolos, que son microscópicos y están rodeados por capilares, donde se efectúa el intercambio de gases. La arteria pulmonar lleva sangre sin oxígeno (azul) a los pulmones; la vena pulmonar lleva sangre oxigenada (roja) de regreso al corazón. ***b)*** Vista amplificada de los alveolos (se muestra su interior en esta sección recortada) y los capilares que los rodean.

quios y la tráquea. Al llegar a la faringe, el moco se expulsa tosiendo, o bien, se deglute. La acción de fumar interfiere con este proceso de limpieza porque paraliza los cilios (véase "Guardián de la salud: Fumar: una decisión de vida"). El *asma* se presenta cuando el tejido liso de los músculos en los bronquiolos se vuelve hipersensible y la producción de moco aumenta, generalmente por una alergia a alguna sustancia presente en el aire, como el polen. Los bronquiolos sufren espasmos y reducen su diámetro. La víctima de asma tiene especial dificultad para exhalar a través de los bronquiolos constreñidos, puesto que el volumen de aire reducido provocado por la exhalación permite que los conductos obstruidos con mucosidad se colapsen más fácilmente.

El intercambio de gases se efectúa en los alveolos

Los pulmones han evolucionado hasta crear una muy extensa superficie húmeda para el intercambio de gases. La densa red de bronquiolos conduce aire a diminutas estructuras, los alveolos, que se agrupan alrededor del extremo de cada bronquiolo como si se tratara de un racimo de uvas. En un adulto normal, los dos pulmones poseen, en conjunto, unos 300 millones de alveolos. Estas cámaras microscópicas (0.2 milímetros de diámetro) confieren al tejido pulmonar amplificado un aspecto esponjoso y de color rosado. Los alveolos ofrecen una extensa área superficial para la difusión, en total unos 140 metros cuadrados, unas 80 veces el área superficial de la piel de

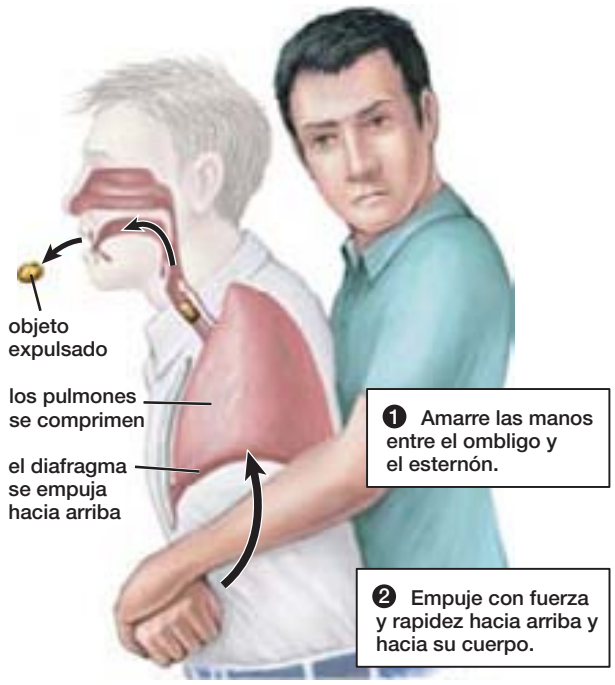

objeto expulsado
los pulmones se comprimen
el diafragma se empuja hacia arriba
❶ Amarre las manos entre el ombligo y el esternón.
❷ Empuje con fuerza y rapidez hacia arriba y hacia su cuerpo.

FIGURA 33-8 La maniobra de Heimlich puede salvar vidas
Si una persona se atragantó con comida u otro objeto y no puede respirar, la maniobra de Heimlich empuja hacia arriba el diafragma de la víctima y fuerza a que el aire salga de los pulmones, lo que facilita la expulsión del objeto. Se debe repetir esta maniobra si es necesario.

un humano adulto. Una red de capilares cubre aproximadamente el 85 por ciento de la superficie alveolar (véase la figura 33-7b). Las paredes de los alveolos, que constan de una sola capa de células epiteliales, forman la porción más interna de la *membrana respiratoria*. La membrana respiratoria a través de la cual se difunden los gases consiste en el epitelio de los alveolos y las células endoteliales que forman la pared de cada capilar. Estas dos capas están unidas entre sí por fibras de colágeno. Puesto que tanto la pared alveolar como las paredes de los capilares adyacentes apenas tienen una célula de espesor, los gases deben difundirse sólo una corta distancia para moverse entre el aire y la sangre (**FIGURA 33-9**). Los alveolos están revestidos con una delgada capa de líquido que contiene una secreción oleaginosa (llamada *surfactante*), la cual reduce la tensión superficial y evita que los alveolos se colapsen durante la exhalación. La enfermedad pulmonar llamada *enfisema*, que por lo regular es provocada por el tabaquismo, hace que los alveolos se rompan, lo que reduce severamente el área disponible para el intercambio de gases (el enfisema se explica con detalle en la sección "Guardián de la salud: Fumar: una decisión de vida").

Una vez que la sangre con oxígeno circula por los tejidos del cuerpo, el corazón la bombea hacia los pulmones. La sangre que llega y rodea a los alveolos contiene poco oxígeno (porque las células del cuerpo lo han consumido) y mucho dióxido de carbono (que es liberado por las células; véase la figura 33-2). El dióxido de carbono sale de la sangre por difusión, pues su concentración ahí es alta, y pasa al aire de los alveolos, donde su concentración es más baja (véase la figura 33-9). La concentración de dióxido de carbono en la sangre es especialmente alta después de un esfuerzo, como subir corriendo las escaleras para llegar a clase. Conforme el dióxido de carbono pasa por difusión al aire en los alveolos, el oxígeno pasa por difusión del aire —donde su concentración es alta— a la sangre, donde su concentración es baja. La sangre proveniente de los pulmones, ahora oxigenada y depurada de dióxido de carbono, vuelve al corazón, que la bombea a los tejidos del cuerpo. En los tejidos, el oxígeno pasa por difusión a las células porque su concentración es más baja en ellas que en la sangre.

El oxígeno y el dióxido de carbono son transportados por mecanismos distintos

El dióxido de carbono (CO_2) se produce constantemente a partir de la respiración de todas las células. La sangre de los capilares recoge el dióxido de carbono y lo lleva a los pulmones, donde pasa por difusión y se exhala. En la sangre el dióxido de carbono se transporta de tres formas distintas

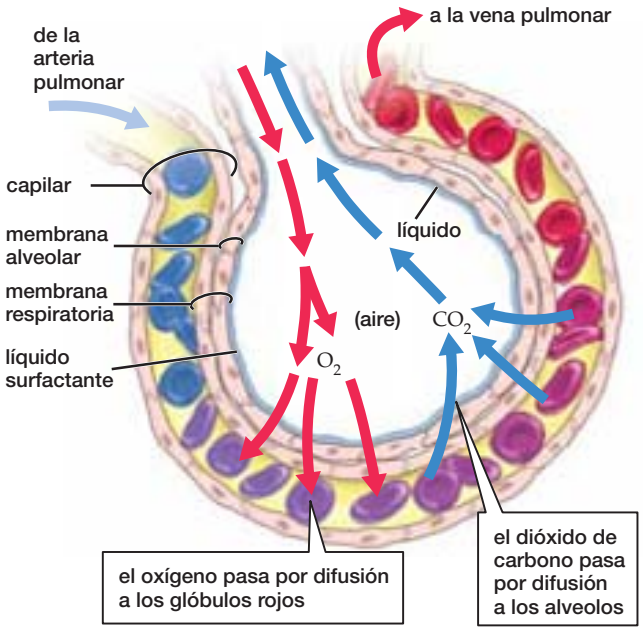


FIGURA 33-9 Intercambio de gases entre los alveolos y los capilares
Las paredes de los alveolos y de los capilares tienen apenas el grosor de una célula y están muy cercanas entre sí, con células cubiertas por una delgada capa de líquido. Esto permite que los gases se disuelvan y difundan fácilmente entre los pulmones y el sistema circulatorio.

GUARDIÁN DE LA SALUD Fumar: una decisión de vida

Se calcula que unos 440,000 estadounidenses mueren por enfermedades relacionadas con el tabaquismo cada año; esto incluye cáncer pulmonar, enfisema, bronquitis crónica, infartos al miocardio, accidentes cerebrovasculares y otras formas de cáncer.

El humo del tabaco tiene un efecto drástico sobre las vías respiratorias humanas. Al inhalarse, las sustancias tóxicas como la nicotina y el dióxido de azufre paralizan los cilios que recubren a las vías respiratorias; un solo cigarrillo puede desactivarlos durante una hora. Como estos cilios "barrenderos" se encargan de eliminar las partículas inhaladas, el hecho de fumar inhibe su actividad justo cuando más se le necesita. La porción visible del humo del cigarrillo consiste en miles de millones de partículas microscópicas de carbono. Unas 200 sustancias tóxicas se adhieren a esas partículas, y se sabe que más de una docena de ellas son *carcinógenos* o posibles carcinógenos (sustancias que causan cáncer). Al quedar desactivados los cilios, las partículas se adhieren a las paredes de las vías respiratorias y entran en los pulmones.

El humo del cigarrillo también afecta negativamente a los glóbulos blancos que defienden las vías respiratorias envolviendo las partículas extrañas y las bacterias. Por ello, entran en los pulmones aún más bacterias y partículas de polvo y humo. Como respuesta a la irritación del humo del cigarrillo, las vías respiratorias producen más moco, que es otro método para atrapar las partículas extrañas. El problema es que, sin los cilios que lo desplazan, el moco se acumula y puede obstruir las vías respiratorias; la conocida "tos de fumador" es un intento por expulsarlo. Partículas microscópicas de humo se acumulan en los alveolos al paso de los años hasta que los pulmones del fumador quedan literalmente ennegrecidos (compara un pulmón normal en la **FIGURA E33-3a** con el pulmón enfermo en la **FIGURA E33-3b**). Cuanto más tiempo estén expuestos los delicados tejidos de los pulmones a los carcinógenos de las partículas atrapadas, mayor es la posibilidad de desarrollar cáncer (**FIGURA E33-3c**).

Algunos fumadores desarrollan *bronquitis crónica*, una infección persistente de los pulmones caracterizada por tos, inflamación del revestimiento de las vías respiratorias, aumento en la producción de moco y reducción en el número y la actividad de los cilios. El resultado es una reducción en el flujo de aire hacia los alveolos. El *enfisema* se presenta (figura E33-3b) cuando las sustancias tóxicas del humo del tabaco estimulan al organismo para producir sustancias que hacen que los alveolos se vuelvan quebradizos y se rompan. La pérdida de los alveolos, donde se intercambian gases, provoca la falta de oxígeno en todos los tejidos del cuerpo. Una persona con enfisema tiene dificultad para respirar y su condición va empeorando hasta que muere.

El monóxido de carbono, presente en niveles elevados en el humo del tabaco, se une tenazmente a los glóbulos rojos en vez del oxígeno. Esta unión reduce la capacidad de la sangre para transportar oxígeno y, por consiguiente, obliga al corazón a trabajar más. La bronquitis crónica y el enfisema complican este problema. El tabaquismo también causa *aterosclerosis*, un engrosamiento de las paredes arteriales por depósitos grasos, lo cual puede causar infartos al miocardio (véase el capítulo 32). Por ello, los fumadores tienen una probabilidad 70 por ciento mayor que los no fumadores de morir por una enfermedad cardiaca. Las heridas y los huesos rotos de los fumadores tardan más en sanar y es más probable que su piel se arrugue prematuramente. El monóxido de carbono del humo del tabaco también podría contribuir a los problemas que experimentan las mujeres embarazadas que fuman, porque el feto en desarrollo se ve privado de oxígeno. Además, entre las complicaciones reproductivas que provoca el tabaquismo se incluyen una mayor incidencia de infertilidad, abortos espontáneos, menor peso de los bebés al nacer y, más adelante, problemas de aprendizaje y de conducta en los hijos.

El "tabaquismo pasivo", que consiste en respirar humo de segunda mano, es un peligro real para la salud tanto de niños como de adultos. Los investigadores han llegado a la conclusión de que los hijos de padres que fuman tienen mayor probabilidad de contraer bronquitis, pulmonía, infecciones del oído, tos y resfriados, así como de tener capacidad pulmonar disminuida. Los niños que crecen al lado de fumadores tienen mayor probabilidad de desarrollar asma y alergias; en el caso de niños con asma, el número y la gravedad de los ataques asmáticos aumentan con la exposición al humo de segunda mano. Entre los adultos, los estudios han llegado a la conclusión de que los

FIGURA 33-10a): un poco se disuelve en el plasma; una mayor cantidad se une débilmente a la **hemoglobina**, una proteína que contiene hierro y que está contenida en los glóbulos rojos; y la mayor parte de él se combina con agua para formar iones bicarbonato (HCO_3^-) mediante la siguiente reacción:

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow{\text{(anhidrasa carbónica)}} H^+ + HCO_3^-$$

Esta reacción ocurre en los glóbulos rojos, que contienen la enzima *anhidrasa carbónica*. La mayor parte del HCO_3^- pasa por difusión al plasma, donde ayuda a mantener el pH adecuado de la sangre (alrededor de un pH de 7.4; el H^+ restante se queda en los glóbulos rojos unido a la hemoglobina). Esta reacción se invierte cuando los capilares corren por los alveolos, donde el dióxido de carbono es bajo (**FIGURA 33-10b**). Tanto la producción de iones bicarbonato como la unión del CO_2 a la hemoglobina reducen la concentración de CO_2 disuelto en la sangre y elevan el gradiente para que el CO_2

A medida que la sangre de los capilares, rica en dióxido de carbono proveniente de los tejidos, fluye por los alveolos de los pulmones (o de las membranas de otros órganos donde se realiza el intercambio de gases), libera el CO_2 y recoge el O_2

cónyuges no fumadores de las personas que fuman enfrentan un riesgo un 30 por ciento mayor de sufrir infartos al miocardio y cáncer pulmonar en comparación con los cónyuges de no fumadores. Un estudio reciente vincula la exposición incluso poco frecuente al humo de segunda mano con la aterosclerosis. Algunas dependencias del gobierno calculan que el humo de segunda mano es la causa de 3000 muertes por cáncer pulmonar y de por lo menos 35,000 muertes por enfermedades cardiacas de no fumadores cada año en Estados Unidos.

En los fumadores que abandonan el hábito, el cuerpo comienza de inmediato a sanar y la probabilidad de un infarto al miocardio, cáncer pulmonar y numerosas enfermedades más relacionadas con el tabaquismo disminuye gradualmente (véase "Enlaces con la vida: Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores").

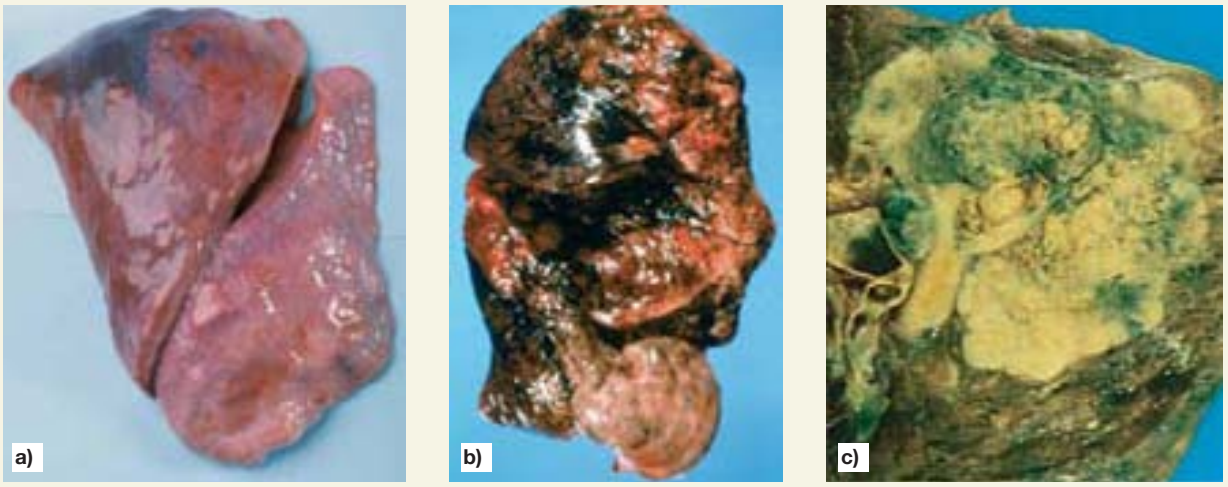


FIGURA E33-3 Daños a los pulmones provocados por el tabaquismo
a) Un pulmón normal. ***b)*** El pulmón de un fumador que murió de enfisema está ennegrecido y colapsado. ***c)*** El cáncer pulmonar se hace visible como una masa pálida; el tejido pulmonar que lo rodea está ennegrecido por las partículas de humo atrapadas. El tabaquismo es responsable de un 87 por ciento de todos los cánceres de pulmón y es la causa principal de muertes por cáncer en Estados Unidos.

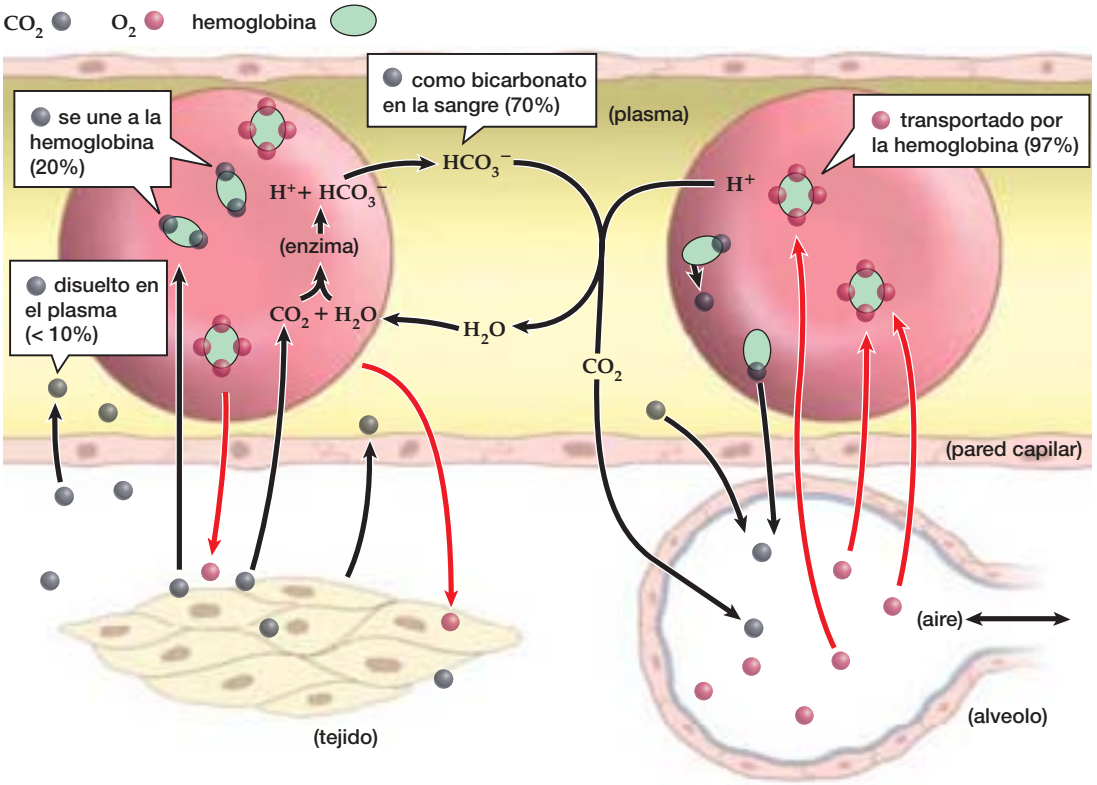


FIGURA 33-10
Mecanismo del intercambio de gases

ENLACES CON LA VIDA Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores

¿Acaso tú o algún conocido tuyo han dejado de fumar? La Asociación Neumológica de Estados Unidos tiene noticias alentadoras: una línea del tiempo de las mejorías que experimentan los ex fumadores conforme sus cuerpos comienzan a recuperarse, a partir de que fumaron el último cigarrillo. Si una persona deja de fumar, después de 20 minutos, la presión arterial y el pulso disminuyen. Después de ocho horas, el nivel de monóxido de carbono en la sangre se reduce, mientras que el oxígeno en la sangre aumenta a niveles normales. Después de 24 horas su oportunidad de sufrir un infarto al miocardio disminuye. Después de 48 horas recupera su capacidad de oler y saborear los alimentos. De dos semanas a tres meses después, es capaz de hacer ejercicio más fácilmente conforme las funciones del sistema circulatorio y del aparato respiratorio mejoran. De uno a nueve meses después, la tos disminuye y hay menos congestión en los senos paranasales; además, se siente más energía. Después de un año se tiene la mitad del riesgo de un fumador de padecer una enfermedad coronaria. Después de cinco años el riesgo de sufrir un accidente cerebrovascular comienza a disminuir. Después de 10 años de abandonar el hábito, el riesgo de sufrir cáncer pulmonar es la mitad del que tiene un fumador, y la probabilidad de padecer cáncer en el páncreas, los riñones, la vejiga, el esófago, la garganta y la boca también se reduce. Después de 15 años el riesgo de morir por algún factor relacionado con el tabaquismo es casi tan bajo como el de quienes jamás han fumado. (Con información de "What Are the Benefits of Quitting Smoking?", publicado por la Asociación Neumológica de Estados Unidos en http://www.lungusa.org).

totalmente para formar CO_2. En niveles elevados, el CO es mortal porque "engaña" a la hemoglobina, uniéndose a ella en lugar del oxígeno y con una fuerza 200 veces mayor. Una persona puede morir si respira aire con tan sólo 0.1 por ciento de CO. La hemoglobina que contiene CO es de color rojo brillante (al igual que la hemoglobina oxigenada), pero no puede transportar oxígeno porque los sitios de unión para este gas se encuentran ocupados. Casi todas las víctimas de asfixia tienen labios y uñas azulosos porque su hemoglobina está desoxigenada; los labios y las uñas de las víctimas de envenenamiento con monóxido de carbono (que podría presentarse al respirar el escape de un automóvil en un espacio cerrado) son más rojos de lo normal.

El aire se inhala activamente y se exhala pasivamente

La respiración se efectúa en dos etapas: **1. inhalación**, cuando se introduce aire activamente a los pulmones, y **2. exhalación**, cuando se expulsa pasivamente de los pulmones. La inhalación se logra agrandando la cavidad torácica, mediante la contracción del **diafragma**, un músculo que forma el límite inferior de la cavidad torácica. En reposo, este delgado músculo se arquea hacia arriba, pero la contracción tira de él hacia abajo y, de esta forma, se expande la cavidad torácica. Los músculos de las costillas también se contraen, levantando las costillas hacia arriba y hacia fuera (FIGURA 33-11a). Cuando la cavidad torácica se expande, los pulmones se expanden con ella porque un vacío con una capa de líquido los mantiene pegados a la pared interna del tórax. Al expandirse los pulmones junto con la cavidad torácica durante la inhalación, su mayor volumen crea un vacío parcial que succiona aire hacia ellos. Una herida que perfore el tórax es peligrosa, en parte, porque permite que el aire penetre entre la pared torácica y los pulmones, evitando que éstos se expandan cuando la cavidad torácica lo hace.

Aunque el aire puede exhalarse de manera forzada, en reposo, la exhalación se efectúa automáticamente cuando se relajan los músculos que causan la inhalación. El diafragma relajado se curva hacia arriba y las costillas caen hacia abajo y hacia dentro, lo que reduce el tamaño de la cavidad torácica y expulsa el aire de los pulmones (FIGURA 33-11b

nen aire. Este aire evita que los delgados alveolos se colapsen y llena el espacio dentro de la porción conductora del sistema respiratorio. Una respiración normal desplaza apenas unos 500 mililitros de aire "nuevo" en el sistema respiratorio. De este volumen, sólo unos 350 mililitros llegan a los alveolos para que haya intercambio de gases. La respiración más profunda durante el ejercicio hace que se intercambie un volumen varias veces mayor.

El centro respiratorio del cerebro controla la frecuencia respiratoria

Imaginemos tener que pensar para respirar. Por fortuna, la respiración es rítmica y automática, sin necesidad de conciencia. Pero, a diferencia del músculo cardiaco, los músculos que se usan para respirar no se autoactivan; cada contracción es estimulada por impulsos de células nerviosas. Estos impulsos se originan en el **centro respiratorio**

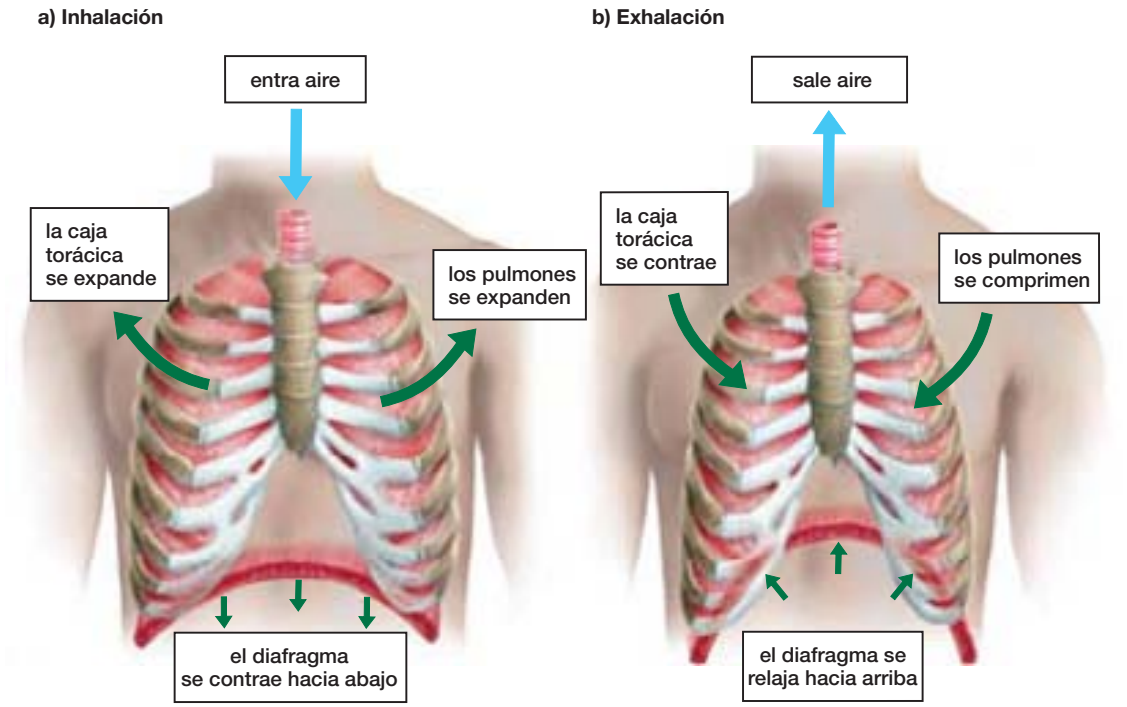


FIGURA 33-11 Mecánica de la respiración

a) Durante la inhalación, los impulsos nerviosos rítmicos del cerebro estimulan al diafragma para que se contraiga (lo que tira de él hacia abajo) y también a los músculos que rodean a las costillas (lo que las mueve hacia arriba y hacia fuera). El resultado es un aumento en el tamaño de la cavidad torácica que succiona aire hacia su interior. ***b)*** La relajación de estos músculos (exhalación) permite que el diafragma se curve hacia arriba y que la caja torácica se colapse, lo que expulsa el aire de los pulmones. PREGUNTA: Imagina que una mujer que vive a nivel del mar viaja a la cima de una alta montaña; ahí, inhala con una contracción muscular exactamente de la misma fuerza a la que está acostumbrada cuando se encuentra en reposo en su casa a nivel del mar. ¿La inhalación resultante contendrá un volumen de aire mayor, menor o igual que al nivel del mar? ¿Por qué?

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO VIDAS QUE SE ESFUMAN

Mark Twain dijo una vez: "Dejar de fumar es fácil, yo lo he hecho mil veces". La nicotina es una poderosa droga adictiva, y tiene tanta probabilidad de conducir a la adicción como la cocaína o la heroína. La mayoría de los fumadores consumen cigarrillos diariamente, unos 14 en promedio. Los investigadores han encontrado que, al igual que la cocaína y la heroína, la nicotina activa el centro cerebral de recompensa. El cerebro experimenta ciertas adaptaciones: se vuelve menos sensible, requiere mayores cantidades de nicotina para experimentar el mismo efecto de recompensa y provoca que el centro de recompensa se sienta subestimulado cuando se le retira la nicotina. Los síntomas de abstinencia pueden incluir el deseo compulsivo de nicotina, depresión, ansiedad, irritabilidad, dificultad para concentrarse, dolores de cabeza y sueño interrumpido. Así que no es de sorprender que para algunos, la única forma de dejar de fumar es no comenzar a hacerlo. Aunque por lo menos el 79 por ciento de los fumadores desearían abandonar el hábito, sólo un 2.5 por ciento de ellos lo logran cada año. Al llegar a los 60 años, aproximadamente un 33 por ciento habrá tenido éxito, la mayoría de ellos sólo después de dos o tres intentos. De aquellos que continúan fumando, alrededor de un tercio morirá a causa de un factor relacionado con el tabaquismo. Un estudiante de la Universidad de Illinois expresa una actitud común entre los jóvenes fumadores: "Sé que es malo para mí y que podría matarme. Tengo 21 años y no soy ciego ante las consecuencias. Mi abuelo murió de cáncer porque fumó toda su vida". Un estudiante que no fuma explica: "La gente fuma sin importarle lo que le pueda pasar. Uno podrá mostrarles fotografías de pulmones (cancerosos) o de dientes podridos por el tabaco, pero esto no les causa ningún efecto… Cada quien tiene el derecho de elegir la vida que quiere".

Piensa en esto Los costos médicos directos de tratar el cáncer pulmonar ascienden aproximadamente a $5000 millones cada año en Estados Unidos. Casi el 90 por ciento de estos cánceres podrían evitarse si la gente no fumara. La mayor parte de estos costos son absorbidos por los seguros médicos. Las crecientes tarifas de los seguros médicos hacen pensar que el porcentaje de trabajadores no asegurados aumentará y que los salarios disminuirán en tanto que las empresas luchen por contener los costos. Analiza las responsabilidades que acompañan al "derecho de elegir" fumar.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

33.1 ¿Por qué es necesario el intercambio de gases?

El sistema respiratorio sustenta la respiración celular. El aire rico en oxígeno que se inhala suministra oxígeno a la sangre, la cual lo lleva a las células de todo el cuerpo. La sangre también recoge CO_2 (producto de la respiración celular) de las células del cuerpo y lo transporta a los pulmones, de donde es liberado a la atmósfera.

33.2 ¿Cuáles son algunas de las adaptaciones evolutivas que permiten el intercambio de gases?

La respiración hace posible el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono entre el cuerpo y el entorno mediante la difusión de esos gases, a través de una superficie húmeda. En los entornos húmedos, los animales cuyo cuerpo es muy pequeño o aplanado podrían depender exclusivamente de la difusión a través de la superficie corporal. Los animales con baja demanda metabólica y/o sistemas circulatorios bien desarrollados podrían carecer también de estructuras respiratorias especializadas. Los animales más grandes y activos han desarrollado sistemas respiratorios especializados. Los que viven en entornos acuáticos poseen branquias o agallas, como los peces y muchos anfibios. En tierra, las superficies respiratorias húmedas deben protegerse internamente. Esta necesidad ha dado pie al desarrollo evolutivo de tráqueas en los insectos, y pulmones en los vertebrados terrestres.

La transferencia de gases entre el sistema respiratorio y los tejidos se efectúa en una serie de etapas que alternan el flujo masivo con la difusión. Aire o agua se mueve por flujo masivo sobre la superficie respiratoria y los gases de la sangre son transportados por flujo masivo. Los gases atraviesan por difusión las membranas entre el sistema respiratorio y los capilares y entre éstos y los tejidos.

33.3 ¿Cómo funciona el aparato respiratorio humano?

El aparato respiratorio humano consiste en una porción conductora —integrada por la nariz y la boca, la faringe, la laringe, la tráquea, los bronquios y los bronquiolos— y una porción de intercambio gaseoso, formada por alveolos (bolsas microscópicas). La sangre dentro de una densa red de capilares que rodean a los alveolos libera dióxido de carbono y absorbe oxígeno del aire.

Casi todo el oxígeno de la sangre está unido a la hemoglobina dentro de los glóbulos rojos. Al eliminar el oxígeno de la solución, la hemoglobina mantiene un gradiente de concentración favorable que permite que el oxígeno pase fácilmente por difusión del aire a la sangre. Luego la hemoglobina transporta el oxígeno a los tejidos del cuerpo, donde se difunde siguiendo el gradiente de concentración. El dióxido de carbono se difunde hacia la sangre desde los tejidos y se transporta en tres formas: como iones bicarbonato, unido a la hemoglobina o disuelto en el plasma.

La respiración implica succionar activamente aire hacia los pulmones contrayendo el diafragma y los músculos de las costillas, lo que expande la cavidad torácica. El relajamiento de esos músculos hace que la cavidad torácica reduzca su volumen y expulse el aire. La respiración está controlada por impulsos nerviosos que se originan en el centro respiratorio del bulbo raquídeo. El ritmo de la respiración se modifica mediante receptores, como los del bulbo raquídeo que vigilan los niveles de dióxido de carbono en la sangre.

Web tutorial 33.1 El aparato respiratorio humano

TÉRMINOS CLAVE

alveolos *pág. 675*
branquia *pág. 672*
bronquiolos *pág. 675*
bronquios *pág. 675*
centro respiratorio *pág. 680*
cuerdas vocales *pág. 675*
diafragma *pág. 680*
espiráculo *pág. 672*
exhalación *pág. 680*
faringe *pág. 675*
flujo masivo *pág. 671*
hemoglobina *pág. 678*
inhalación *pág. 680*
intercambio contracorriente *pág. 674*
laringe *pág. 675*
porción conductora *pág. 675*
porción de intercambio de gases *pág. 675*
pulmón *pág. 672*
tráquea (en aves y mamíferos) *pág. 675*
tráquea (en insectos) *pág. 672*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Describe el intercambio contracorriente. ¿Cuáles son los beneficios de este proceso? ¿Cómo funciona en las branquias de los peces?
2. Rastrea la ruta que sigue el aire en el sistema respiratorio de los vertebrados, indicando las estructuras por las que fluye y el punto en el que se efectúa el intercambio de gases.
3. Explica algunas características de animales que viven en entornos húmedos que podrían complementar a los sistemas respiratorios o hacerlos innecesarios.
4. ¿Cómo se inician los movimientos respiratorios en el ser humano? ¿Cómo se modifican? ¿Por qué son adaptativos estos controles?
5. ¿Qué sucesos ocurren durante la inhalación humana? ¿Durante la exhalación? ¿Cuál de éstos es siempre un proceso activo?
6. Sigue el camino de una molécula de oxígeno en el cuerpo humano, desde la nariz hasta una célula del cuerpo.
7. Describe los efectos del tabaquismo sobre el aparato respiratorio humano.
8. Explica cómo el flujo masivo y la difusión interactúan para promover el intercambio de gases entre el aire y la sangre, y entre ésta y los tejidos.
9. Compara el transporte de dióxido de carbono y de oxígeno en la sangre. Incluye el origen y el destino de cada uno.
10. Explica cómo la estructura y la disposición de los alveolos los hacen idóneos para su papel en el intercambio de gases.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. En algunos casos se realizan trasplantes de corazón-pulmón, cuando ambos órganos están dañados, por ejemplo, a causa del tabaquismo; pero hay muy pocos donadores. Con base en lo que sabes del aparato respiratorio, del sistema circulatorio y de los factores de estilo de vida que podrían dañarlos, ¿qué criterios usarías para seleccionar a un receptor de un trasplante de ese tipo?
2. La nicotina es una droga presente en el tabaco que causa varios de los efectos que ansían los fumadores. Comenta las ventajas y desventajas de los cigarrillos bajos en nicotina.
3. Comenta por qué una exposición breve a monóxido de carbono es mucho más peligrosa que una exposición breve a dióxido de carbono.
4. Repasa los sistemas respiratorio y circulatorio (véase el capítulo 32) de insectos y mamíferos. ¿De qué forma el sistema respiratorio de un insecto realiza algunas de las funciones del sistema circulatorio de los mamíferos?
5. María, una resuelta niña de tres años, amenaza con retener la respiración hasta morir si no consigue lo que quiere. ¿Podría cumplir su amenaza? Explica por qué.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Platt, C. "Here, Breathe This Liquid". *Discover*, octubre de 2001. Llenar los pulmones con perfluorocarbonos fríos y enriquecidos con oxígeno podría incrementar las oportunidades de supervivencia de los pacientes cuyos corazones han dejado de latir. Después de que el corazón reinicia su actividad, el líquido a baja temperatura podría enfriar rápidamente el cuerpo y reducir los requerimientos del cerebro y las reacciones químicas dañinas que ocurren cuando el tejido cerebral se encuentra carente de oxígeno.

Rist, C. "The Physics of…Singing". *Discover*, agosto de 1999. El autor describe cómo las cuerdas vocales convierten el flujo de aire en notas musicales.

Seppa, N. "Secondary Smoke Carries High Price". *Science News*, 17 de enero de 1998. La investigación sugiere que fumar provoca aterosclerosis, que el daño continúa incluso después de que una persona ha dejado de fumar y que la exposición al humo de segunda mano aumenta significativamente la acumulación de placa en las arterias carótidas de los no fumadores.

Wheelwright, J. "Toxic Inheritance". *Discover*, marzo de 2006. Existe evidencia de que los contaminantes que inhala una madre podrían alterar su DNA en formas que podrían dañar a sus hijos.

CAPÍTULO 34

Nutrición y digestión

Carré Otis, ahora recuperada de la anorexia, observa su imagen saludable en el espejo. Las personas anoréxicas se miran al espejo y ven un individuo con sobrepeso, sin importar qué tan esqueléticos estén sus cuerpos.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: ¿Adelgazar hasta morir?

34.1 ¿Qué nutrimentos necesitan los animales?

La energía se obtiene de los nutrimentos y se mide en calorías

Los lípidos incluyen triglicéridos (grasas), fosfolípidos y colesterol

Guardián de la salud: Cuando se antoja una hamburguesa con queso

Los carbohidratos son una fuente de energía rápida

Los aminoácidos forman los bloques de construcción de las proteínas

Los minerales son elementos indispensables para el cuerpo

Las vitaminas desempeñan diversos papeles en el metabolismo

Dos terceras partes del cuerpo humano se componen de agua

Ciertas pautas nutricionales ayudan a obtener una dieta equilibrada

34.2 ¿Cómo se efectúa la digestión?

Generalidades de la digestión

En las esponjas la digestión se efectúa dentro de células individuales

Una bolsa con una abertura es el sistema digestivo más simple

La digestión en un tubo permite a los animales alimentarse con mayor frecuencia

Especializaciones digestivas

34.3 ¿Cómo digieren los alimentos los seres humanos?

El desdoblamiento mecánico y químico de los alimentos se inicia en la boca

El esófago conduce los alimentos al estómago

Casi toda la digestión se efectúa en el intestino delgado

Guardián de la salud: Las úlceras digieren el tracto digestivo

Casi toda la absorción se efectúa en el intestino delgado

En el intestino grueso se absorbe agua y se forman heces

La digestión es controlada por el sistema nervioso y ciertas hormonas

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Adelgazar hasta morir?

ESTUDIO DE CASO ¿ADELGAZAR HASTA MORIR?

LA SUPERMODELO CARRÉ OTIS explica: "Los sacrificios que yo hacía ponían en riesgo mi vida. Había entrado en un mundo que parecía basarse en la mentalidad de que había que mantener una delgadez anormal 'a cualquier costo'". Para muchos modelos, actores y otros personajes que están bajo la mirada del público, cumplir las expectativa s de extrema delgadez es una batalla continua que puede conducirlos al desastre. Entre las víctimas célebres se encuentran Jane Fonda, la desaparecida princesa Diana y Elton John. Carré, quien mide 1.78, llegó a pesar 45 kilos. Ahora mantiene un peso saludable —a expensas de su carrera de modelo— y se ha convertido en vocera de la Asociación Nacional de Trastornos Alimentarios de Estados Unidos. Ella espera ayudar a otros a evitar el daño que sufrió su cuerpo. "Era común que las chicas con quienes yo trabajaba sufrieran infartos al miocardio; si un trastorno alimentario no se trata a tiempo, puede convertirse en una enfermedad mortal".

La selección natural ha equipado a los animales con fuertes impulsos para comer cuando se necesitan nutrimentos (e incluso cuando se necesitan, si la comida está disponible), pero en algunas personas, estos impulsos naturales tienen resultados negativos. En las últimas décadas hemos atestiguado un incremento tanto de personas que comen de más como de quienes padecen *trastornos alimentarios*, los cuales son afecciones caracterizadas por una severa perturbación del comportamiento normal de alimentación.

Los trastornos alimentarios incluyen dos enfermedades particularmente debilitantes: la *anorexia nerviosa* y la *bulimia nerviosa*. Los individuos con bulimia —quienes pueden ser anoréxicos, o bien, mantener un peso normal— participan en grandes comilonas, lo que significa que consumen grandes cantidades de alimentos en un breve lapso. Después de esas comilonas se provocan el vómito o toman una sobredosis de laxantes para eliminar los alimentos de su cuerpo. También es común que los bulímicos hagan ejercicio excesivo para quemar las calorías que consumieron. El vómito continuo daña el aparato digestivo y altera el equilibrio normal de sales en la sangre, lo que puede conducir a afecciones cardiacas.

Quienes padecen anorexia experimentan un miedo intenso a subir de peso, y logran una pérdida excesiva de peso —algunos pierden hasta un 30 por ciento de su peso normal— comiendo muy poco y en ocasiones ejercitándose excesivamente. Aunque tienen una apariencia esquelética, los anoréxicos se ven gordos a sí mismos. Aproximadamente la mitad de todos los anoréxicos también desarrollan bulimia. Y las consecuencias son desastrosas. Los anoréxicos se ven demacrados, ya que pierden tanto grasa como músculo. En el proceso, a menudo alteran sus funciones digestivas, cardiacas, endocrinas y reproductivas. Las personas entre 18 y 24 años que padecen anorexia tienen 12 veces más probabilidades de morir que otras en su mismo grupo de edad.

Más del 90 por ciento de los diagnósticos de trastornos alimentarios corresponden a mujeres; la incidencia de anorexia está entre 0.5 y 2 por ciento , y la de bulimia entre el 1 y 2 por ciento de las mujeres estadounidenses. ¿Cómo es que los trastornos alimentarios dañan el aparato digestivo? ¿Qué los provoca? Consulta las respuestas en "Otro vistazo al estudio de caso".

34.1 ¿QUÉ NUTRIMENTOS NECESITAN LOS ANIMALES?

Todos los alimentos, desde el brócoli hasta una malteada de chocolate, contienen nutrimentos que necesitamos para sobrevivir. Los **nutrimentos** se clasifican en seis categorías: lípidos, carbohidratos, proteínas, minerales, vitaminas y agua. Estas sustancias satisfacen las necesidades básicas del cuerpo, incluyendo energía y materias primas para sintetizar las moléculas de la vida: enzimas, proteínas estructurales, material genético, portadores de energía, el calcio que compone los huesos y los componentes a base de lípidos de todas las membranas celulares, sólo por mencionar algunas.

La energía se obtiene de los nutrimentos y se mide en calorías

Las células dependen de un continuo suministro de energía para mantener su increíble complejidad y realizar una amplia gama de funciones. Cuando se les priva de esta energía, las células comienzan a morir en el lapso de unos cuantos segundos. Dos tipos de nutrimentos aportan la mayor cantidad de energía a la dieta de los animales: carbohidratos y lípidos (en Estados Unidos un individuo promedio también obtiene alrededor de un 15 por ciento de su energía de las proteínas). Estas moléculas se desdoblan mediante el proceso de digestión y sus subunidades se metabolizan durante la respiración celular; de esta forma, se libera energía que se capta en el trifosfato de adenosina (ATP) (véase el capítulo 3).

La energía de los nutrimentos se mide en calorías. Una **caloría** es la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de 1 gramo de agua en 1 grado Celsius. El contenido calórico de los alimentos se mide en unidades de 1000 calorías *(kilocalorías),* también llamadas **Calorías** (con *C* mayúscula). El cuerpo humano promedio en reposo quema unas 70 Calorías por hora, pero esta cantidad varía en función de la complexión del cuerpo, la masa muscular, la edad, el sexo y factores genéticos. El ejercicio eleva considerablemente los requerimientos calóricos: un atleta bien entrenado puede elevar temporalmente su consumo de calorías desde 1 Caloría por minuto en reposo hasta casi 20 Calorías por minuto durante el ejercicio vigoroso (tabla 34-1).

Los lípidos incluyen triglicéridos (grasas), fosfolípidos y colesterol

Aunque en nuestra sociedad excedida de peso a veces se les considera como enemigos, los triglicéridos y otros lípidos son nutrimentos esenciales. Los lípidos son un grupo diverso de moléculas que incluyen los *triglicéridos* (grasas), los *fosfolípidos* y el *colesterol* (véase el capítulo 3). Los triglicéridos se utilizan primordialmente como fuente de energía. Los fosfolípidos son importantes componentes de las membranas celulares, en tanto que el colesterol se emplea en la síntesis de membranas celulares, hormonas sexuales y bilis (que ayuda a desdoblar los lípidos). Algunas especies animales son capaces de sintetizar todos los lípidos que constituyen los "bloques de construcción" necesarios para formar los lípidos especializados que necesitan. Otras especies deben obtener algunos de éstos, llamados **ácidos grasos esenciales**, a partir de su alimento. Por ejemplo, el ser humano no puede sintetizar el ácido linoleico, que se necesita para la síntesis de ciertos fosfolípidos, por lo que debe obtener ese ácido graso esencial de la dieta.

Los animales almacenan energía en forma de triglicéridos

Cuando la dieta de un animal proporciona más energía de la que éste necesita para sus actividades metabólicas, casi todos los carbohidratos y proteínas en exceso se convierten en triglicéridos para almacenarse. En cada kilogramo de triglicéridos se almacenan aproximadamente unas 8000 Calorías. Los triglicéridos tienen dos ventajas importantes como moléculas para almacenar energía. En primer lugar, son la fuente de energía más concentrada, pues contienen más del doble de energía por unidad de peso que los carbohidratos o las proteínas (unas 9 Calorías por gramo de triglicéridos, en comparación con las 4 Calorías por gramo, en el caso de las proteínas y los carbohidratos). La segunda ventaja es que los lípidos son *hidrofóbicos*, es decir, no se mezclan con el agua. Por consiguiente, los depósitos de grasa no causan una acumulación adicional de agua en el cuerpo. Por ambas razones, los triglicéridos almacenan más calorías con menos peso que otras moléculas. Ello permite al animal moverse con mayor rapidez (lo que es importante para escapar de depredadores y cazar presas) y gastar menos energía al moverse (lo cual es importante si el abasto de alimentos es limitado). Puesto que el ser humano evolucionó con las mismas restricciones en cuanto a alimentos que los demás animales, tiene una notable tendencia a comer cuando hay alimentos disponibles, a menudo más de lo que necesita, pues podría requerir la energía más adelante. Algunas sociedades modernas tienen acceso casi ilimitado a alimentos altos en calorías. En tal contexto, nuestras tendencias naturales a comer en exceso se convierten en una desventaja y necesitamos tener una enorme fuerza de volun-

Tabla 34-1 Energía aproximada consumida por una persona de 68 kg en diferentes actividades

		Tiempo para "quemar"			
Actividad	Calorías/h	500 Calorías Hamburguesa	340 Calorías Cono de helado	70 Calorías Manzana	40 Calorías 1 taza de brócoli
Correr (10 kph)	700	43 min	26 min	6 min	3 min
Esquí a campo traviesa (moderado)	560	54 min	32 min	7.5 min	4 min
Patinaje en ruedas	490	1 h 1 min	37 min	8.6 min	5 min
Andar en bicicleta (17 kph)	420	1 h 11 min	43 min	10 min	6 min
Caminar (5 kph)	250	2 h	1 h 12 min	17 min	10 min
Jugar con Frisbee®	210	2 h 23 min	1 h 26 min	20 min	11 min
Estudiar	100	5 h	3 h	42 min	24 min

El médico de Patrick Deuel le planteó un ultimátum: hospitalizarse y perder peso o morir. Pero había que derrumbar una pared para que Patrick pudiera salir de su habitación, donde sus 486 kilos lo tenían atrapado. Después de casi un año de dieta y ejercicio bajo supervisión médica, Patrick perdió 191 kilos y estaba listo para una cirugía de derivación gástrica o *bypass*. El médico selló la mayor parte del estómago de Patrick y dejó sólo una pequeña bolsa que se unió con la parte intermedia del intestino delgado (**FIGURA E34-1a**). Ahora su estómago sólo puede recibir pequeñas porciones de alimento, al igual que su intestino delgado, donde se absorben los nutrimentos ricos en calorías.

La obesidad es una epidemia creciente en Estados Unidos. El porcentaje de adultos con sobrepeso ha aumentado a más del doble desde 1980, y entre los niños y adolescentes, ese porcentaje se ha elevado a más del triple. Una forma simple de hacer una estimación de la grasa corporal es calcular el **índice de masa corporal (IMC)**, que se obtiene dividiendo el peso de un individuo (en kilogramos) entre su altura al cuadrado (en el sistema métrico decimal). El cálculo del IMC se aplica a la gente con cantidades promedio de músculo y supone que el peso que excede de esta cantidad corresponde a grasa, de manera que el cálculo no es exacto para personas con una gran musculatura, como aquellas que practican el físico-constructivismo. Muchos sitios de Internet incluyen tablas o efectúan este cálculo por ti: busca bajo el nombre IMC. Un IMC entre 20 y 24 se considera saludable. Un estudio reciente de los Centros para el Control de Enfermedades concluyó que el 66 por ciento de todos los adultos estadounidenses tienen sobrepeso (IMC ≥ 25) y que el 32 por ciento de ellos son obesos (IMC ≥ 34).

¿GENÉTICAMENTE OBESO?

¿Acaso algunas personas "nacieron para ser gordas"? El médico describió a Patrick como "obeso" cuando éste apenas tenía tres meses. Los investigadores han encontrado por lo menos 134 genes diferentes que influyen en el peso de algún modo. Los individuos difieren genéticamente en la forma como sus cuerpos responden al ejercicio, en qué tan satisfechos se sienten después de comer, en cuánta grasa almacenan y en cuántas calorías consumen sus cuerpos en reposo. Aunque nuestros genes no han cambiado apreciablemente en los últimos 20 años, el número de gente con sobrepeso en Estados Unidos ha aumentado drásticamente. A pesar de las diferencias genéticas, toda persona con sobrepeso ha comido más de lo que su cuerpo necesita, al sucumbir ante un impulso que ayudó a nuestros ancestros a sobrevivir a la hambruna. El Instituto Nacional de Salud de Estados Unidos (NIH) aconseja comer más veces pero en menor cantidad, y elegir frutas, vegetales, cereales integrales, carnes magras y lácteos. En respuesta a la demanda de consumo, varias cadenas de comida rápida ahora incluyen opciones saludables en sus menús. El NIH también recomienda realizar ejercicio de moderada intensidad (como caminar, por ejemplo) durante 30 minutos por lo menos, de ser posible, a diario. Para perder peso o para mantenerlo, algunas personas requieren ejercicio adicional. ¿Te parece mucho trabajo? Quizá, pero bien vale la pena. Los individuos con sobrepeso tienen un mayor riesgo de sufrir infartos al miocardio y accidentes cerebrovasculares, diabetes, cáncer, apnea del sueño (es decir, problemas para respirar durante el sueño), osteoartritis, enfermedades hepáticas y cálculos biliares.

¿DELGADO MEDIANTE CIRUGÍA?

Algunas personas tienen dificultad inusual para controlar su peso; en tal caso, los médicos podrían recomendar cirugía para aquellos cuyo peso representa un grave riesgo para la salud. Stuart Logan, por ejemplo, comenzó a engordar cuando cursaba el primer año de la escuela elemental. Para cuando tenía 16 años, pesaba 265 kilos; entonces optó por la *cirugía de la banda gástrica*, aprobada recientemente en Estados Unidos. Como se observa en la **FIGURA E34-1b**, este proceso limita el ingreso de alimento al colocar una banda alrededor de la parte superior del estómago. Tres meses después de la cirugía (que le permitió reducir a la mitad la entrada de alimento a su estómago), Logan había perdido 18 kilos y por fin podía sentarse en el sillón de la peluquería. Mientras que algunos estudios indican que la banda gástrica produce resultados menos espectaculares que la cirugía de derivación gástrica, se trata de una operación quirúrgica más simple, es reversible e implica menos complicaciones que esta última, la cual en ocasiones provoca una deficiencia nutricional porque evita el paso de alimento por una parte del intestino delgado. Mientras tanto, Patrick ya se sometió a una segunda operación para eliminar un sobrante de piel y tejido abdominal que anteriormente albergaba los 272 kilos que perdió. Ahora, que pesa menos de 180 kilos, se regocija al poder ver sus rodillas y ser capaz de caminar de nuevo.

a) Cirugía de derivación gástrica (o bypass)
El extremo superior del estómago se cierra para formar una pequeña bolsa.
El intestino delgado se corta a la mitad de su trayectoria y se une con la bolsa gástrica.
Las secreciones de la parte baja del estómago y de la parte superior del intestino delgado se desvían hacia la porción media del intestino delgado.
b) Cirugía de banda gástrica
Una banda ajustable de silicón se coloca alrededor de la parte superior del estómago para formar una pequeña bolsa y disminuir la rapidez de la entrada del alimento a la parte inferior del estómago.

FIGURA E34-1 Cirugías para perder peso

FIGURA 34-1 La grasa sirve como aislante
Estas morsas pueden soportar las heladas aguas de los mares polares porque cuentan con una gruesa capa de triglicéridos (grasa) aislante bajo la piel.

tad para evitar la obesidad (véase "Guardián de la salud: Cuando se antoja una hamburguesa con queso").

En los animales que mantienen una temperatura corporal elevada, los depósitos de triglicéridos sirven también como aislante, además de almacenar energía. Los triglicéridos, que conducen el calor con una rapidez tres veces menor que otros tejidos corporales, por lo regular se almacenan en una capa debajo de la piel. Las aves (especialmente aquellas que no vuelan, como los pingüinos) y los mamíferos que viven cerca de los polos o en las frías aguas oceánicas necesitan aún más esta capa aislante, la cual reduce la cantidad de energía que deben gastar para mantenerse calientes (**FIGURA 34-1**).

Los carbohidratos son una fuente de energía rápida

Los carbohidratos (descritos en el capítulo 3) incluyen los azúcares *monosacáridos* (como la glucosa, de la cual las células obtienen la mayor parte de su energía), *disacáridos* (como la sacarosa, que es el "azúcar de mesa") y largas cadenas de azúcares llamadas *polisacáridos*. El *almidón*, el *glucógeno* y la *celulosa* son polisacáridos compuestos de cadenas de moléculas de glucosa. El almidón es la principal fuente de energía para la gente y muchos otros animales, y el principal material para almacenar energía en el caso de las plantas. El glucógeno permite a los animales almacenar energía a corto plazo. La celulosa es el principal componente estructural de las paredes celulares de las plantas y es el carbohidrato más abundante en el planeta, pero sólo unas cuantas especies de animales son capaces de digerirla, como se describirá más adelante.

Los animales, incluido el ser humano, almacenan el carbohidrato **glucógeno** (una cadena grande y muy ramificada de moléculas de glucosa) en el hígado y los músculos. Muchos atletas comen alimentos ricos en carbohidratos, como papas y pasta, para hacer que sus cuerpos acumulen tanto glucógeno como sea posible. Aunque el ser humano podría llegar a almacenar cientos de kilos de grasa, sólo almacena menos de un cuarto de kilo de glucógeno. Durante el ejercicio, digamos al correr, el cuerpo utiliza esta reserva de glucógeno como fuente rápida de energía. Si la actividad es prolongada, como en el caso de un maratonista, el glucógeno almacenado podría agotarse. La expresión "echar el bofe" describe la fatiga extrema que los corredores de larga distancia podrían experimentar después de agotar su reserva de glucógeno. Cuando esto ocurre, el corredor debe depender principalmente de los ácidos grasos de la grasa corporal almacenada para obtener energía. Como en este caso las transformaciones metabólicas son más complejas, toma aproximadamente el doble de tiempo extraer energía de los ácidos grasos que del glucógeno. Un corredor al que se le ha agotado el glucógeno, incluso uno con abundante provisión de triglicéridos, podría necesitar reducir su paso drásticamente para compensar esta reducción de energía disponible. Por esta razón, los maratonistas a menudo beben soluciones azucaradas durante la carrera.

Los aminoácidos forman los bloques de construcción de las proteínas

En el tracto digestivo, las proteínas de los alimentos se desdoblan en subunidades, los aminoácidos, los cuales pueden utilizarse para sintetizar nuevas proteínas. Las proteínas desempeñan muchas funciones distintas en el cuerpo, al actuar como enzimas, receptores en las membranas celulares, moléculas portadoras de oxígeno (hemoglobina), proteínas estructurales (cabello y uñas), anticuerpos y proteínas musculares. Los aminoácidos en exceso sirven como fuente de energía, o bien, se convierten en triglicéridos que se almacenan.

El ser humano puede sintetizar 11 de los 20 aminoácidos distintos empleados en las proteínas. Aquellos que no pueden sintetizarse se llaman **aminoácidos esenciales** y deben obtenerse de alimentos como carne, leche, huevos, maíz, frijoles y soya. Puesto que muchas proteínas vegetales son deficientes en algunos de los aminoácidos esenciales, quienes llevan una dieta vegetariana deben incluir gran variedad de productos vegetales (por ejemplo, leguminosas y cereales) cuyas proteínas combinadas proporcionen los nueve aminoácidos esenciales. Una deficiencia de proteínas puede provocar una condición debilitante llamada *kwashiorkor* (**FIGURA 34-2a**), que por lo general se encuentra en países azotados por la pobreza.

Los minerales son elementos indispensables para el cuerpo

Los **minerales** son elementos que desempeñan papeles cruciales en la nutrición animal (**tabla 34-2**). Los minerales deben obtenerse por medio de la dieta, ya sea en los alimentos o disueltos en agua potable, porque el cuerpo no puede fabricarlos. Entre los minerales necesarios están el calcio, el magnesio y el fósforo, que son importantes constituyentes de los huesos y los dientes. El sodio, el calcio y el potasio son esenciales para la contracción muscular y la conducción de impulsos nerviosos. El hierro es un componente fundamental en cada molécula de hemoglobina en la sangre, y el yodo está presente en hormonas producidas por la glándula tiroides. Además, son necesarias cantidades muy pequeñas de otros minerales, como zinc y magnesio (ambos indispensables para el funcionamiento de algunas enzimas), cobre (necesario para la síntesis de la hemoglobina) y cromo (que se utiliza en el metabolismo de los azúcares).

Las vitaminas desempeñan diversos papeles en el metabolismo

"¡Toma tus vitaminas!" es la conocida cantaleta en muchos hogares con niños. Pero, ¿por qué debemos tomarlas? Las **vitaminas** son un grupo diverso de compuestos orgánicos que los animales requieren en pequeñas cantidades para el funcionamiento normal de las células y también para el crecimiento y el desarrollo. Muchas vitaminas se requieren para el adecuado funcionamiento de las enzimas que controlan las reacciones metabólicas en todo el cuerpo. En general, el cuerpo

FIGURA 34-2 Síntomas de deficiencias de proteínas y vitaminas
a) La enfermedad de kwashiorkor es causada por una deficiencia de proteínas. Bajos niveles de la proteína albúmina en la sangre disminuyen la fuerza osmótica de la sangre y permiten que los líquidos se fuguen de los capilares sanguíneos hacia el área abdominal. Los músculos también se debilitan por la falta de proteína. ***b)*** La pelagra, caracterizada por lesiones y escamas en la piel de color rojizo oscuro y una lengua enrojecida e inflamada, es causada por una deficiencia de niacina. ***c)*** El raquitismo, que provoca deformaciones en los huesos, es resultado de una deficiencia de vitamina D.

Tabla 34-2 Principales fuentes de minerales y sus funciones en el ser humano

Mineral	Fuentes en la dieta	Principales funciones en el cuerpo	Síntomas de deficiencia
Calcio	Leche, queso, vegetales de hojas verdes, leguminosas	Formación de huesos y dientes Coagulación sanguínea Transmisión de impulsos nerviosos	Merma del crecimiento Raquitismo, osteoporosis Convulsiones
Fósforo	Leche, queso, carne, aves, cereales	Formación de huesos y dientes Equilibrio ácido-base	Debilidad Desmineralización ósea Pérdida de calcio
Potasio	Carne, leche, frutas	Equilibrio ácido-base Equilibrio del agua corporal Función nerviosa	Debilidad muscular Parálisis
Cloro	Sal de mesa	Formación de jugo gástrico Equilibrio ácido-base	Calambres musculares Apatía Pérdida de apetito
Sodio	Sal de mesa	Equilibrio ácido-base Equilibrio del agua corporal Función nerviosa	Calambres musculares Apatía Pérdida de apetito
Magnesio	Cereales integrales, vegetales de hojas verdes	Activación de enzimas en la síntesis de proteínas	Falta de crecimiento Alteraciones de la conducta Debilidad, espasmos
Hierro	Huevos, carne, leguminosas, cereales integrales, vegetales	Constituyente de hemoglobina y enzimas que participan en el metabolismo energético	Anemia por deficiencia de hierro (debilidad, menor resistencia a infecciones)
Flúor	Agua fluorada, té, mariscos y pescados	Mantenimiento de los dientes y probablemente de la estructura ósea	Alta incidencia de caries dentales
Zinc	Ampliamente distribuido en alimentos	Constituyente de enzimas que participan en la digestión	Falta de crecimiento Glándulas sexuales pequeñas
Yodo	Peces y moluscos marinos, lácteos, muchos vegetales, sal yodada	Constituyente de hormonas de la tiroides	Bocio
Cromo	Frutas, vegetales, cereales integrales	Metabolismo de azúcares y lípidos	Menor tolerancia a la glucosa Insulina elevada en la sangre

Tabla 34-3 Fuentes de vitaminas y sus funciones en el ser humano

Vitamina	Fuentes en la dieta	Funciones en el cuerpo	Síntomas de deficiencia
Hidrosolubles			
Complejo B			
Vitamina B_1 (tiamina)	Leche, carne, pan	Coenzima en reacciones metabólicas	Beriberi (debilidad muscular, cambios en nervios periféricos, edema, insuficiencia cardiaca)
Vitamina B_2 (riboflavina)	Ampliamente distribuida en alimentos	Constituyente de coenzimas en el metabolismo energético	Labios enrojecidos, grietas en las comisuras de la boca, lesiones oculares
Niacina	Hígado, carne magra, cereales, leguminosas	Constituyente de dos coenzimas del metabolismo energético	Pelagra (lesiones cutáneas y gastrointestinales; nerviosismo, trastornos mentales)
Vitamina B_6 (piridoxina)	Carne, verduras, cereales integrales	Coenzima en el metabolismo de aminoácidos	Irritabilidad, convulsiones, tics musculares, dermatitis, cálculos renales
Ácido pantoténico	Leche, carne	Constituyente de la coenzima A, participa en el metabolismo energético	Fatiga, perturbaciones del sueño, merma de coordinación
Ácido fólico	Leguminosas, vegetales de hojas verdes, trigo integral	Coenzima del metabolismo de ácidos nucleicos y aminoácidos	Anemia, perturbaciones gastrointestinales, diarrea, retardo del crecimiento, defectos congénitos
Vitamina B_{12}	Carne, huevo, lácteos	Coenzima en el metabolismo de ácidos nucleicos	Anemia perniciosa, trastornos neurológicos
Biotina	Leguminosas, verduras, carne	Coenzimas requeridas para la síntesis de triglicéridos, metabolismo de aminoácidos y formación de glucógeno	Fatiga, depresión, náuseas, dermatitis, dolor muscular
Colina	Yema de huevo, hígado, cereales, leguminosas	Constituyente de fosfolípidos, precursor del neurotransmisor acetilcolina	No se han informado en el ser humano
Vitamina C (ácido ascórbico)	Cítricos, tomates pimientos y chiles verdes	Mantenimiento de cartílagos, huesos y dentina (tejido duro de los dientes); síntesis de colágeno	Escorbuto (degeneración de la piel, dientes, encías, vasos sanguíneos; hemorragias epiteliales)
Liposolubles			
Vitamina A (retinol)	Beta caroteno en hortalizas de color verde, amarillo y rojo Retinol añadido a lácteos	Constituyente del pigmento visual Mantenimiento de tejidos epiteliales	Ceguera nocturna, ceguera permanente
Vitamina D	Aceite de hígado de bacalao, huevo, lácteos	Promueve el crecimiento y la mineralización de los huesos Aumenta la absorción de calcio	Raquitismo (deformaciones óseas) en niños; deterioro esquelético
Vitamina E (tocoferol)	Semillas, vegetales de hojas verdes, margarinas, manteca	Antioxidante, evita daños celulares provocados por los radicales libres	Posiblemente anemia
Vitamina K	Verduras de hojas verdes Producto de bacterias intestinales	Importante en la coagulación de la sangre	Sangrado, hemorragias internas

no puede sintetizar las vitaminas (o no puede hacerlo en suficiente cantidad), así que las debe obtener de la dieta. Nuestra dieta moderna es tan diferente de la dieta natural con la que evolucionamos que muchas personas sufren de deficiencias vitamínicas incluso si su alimentación es adecuada. Por ejemplo, nuestra piel puede fabricar algo de vitamina D cuando se le expone a la luz solar, pero casi todos nosotros pasamos tanto tiempo en interiores que no sintetizamos la suficiente y debemos obtenerla de la dieta o de complementos. Las vitaminas que se consideran esenciales en la nutrición humana se presentan en la tabla 34-3.

Algunas vitaminas, como la C y E, son *antioxidantes* además de sus otras funciones. Cuando nuestras células generan y usan energía, se producen moléculas dañinas llamadas *radicales libres*, los cuales reaccionan con el DNA, con riesgo de dañarlo y, en algunos casos, provocan cáncer. Además, los radicales libres pueden promover la aterosclerosis y, a lo largo de la vida, contribuir al deterioro fisiológico asociado al envejecimiento. En células que se cultivan en el laboratorio, los antioxidantes se combinan con radicales libres para limitar sus efectos dañinos, y estas vitaminas tienen efectos similares en el cuerpo.

Vitaminas hidrosolubles

Las vitaminas que el ser humano necesita suelen agruparse en dos categorías: solubles en agua o hidrosolubles y solubles en lípidos o liposolubles. Entre las primeras están la vitamina C y los nueve compuestos que constituyen el complejo B. Estas sustancias se disuelven en el plasma sanguíneo y se excretan a través de los riñones, de manera que no se almacenan en el cuerpo en cantidades apreciables. Por esa razón, es indispensable reabastecer al cuerpo de estas vitaminas de manera constante. La mayoría de las vitaminas solubles en agua generalmente operan en colaboración con enzimas para promover reacciones químicas que suministran energía o sintetizan

moléculas biológicas. Puesto que cada vitamina participa en varios procesos metabólicos, la deficiencia de una sola vitamina puede tener efectos generalizados (véase la tabla 34-3). Por ejemplo, una deficiencia de la vitamina B llamada niacina provoca piel agrietada y escamosa característica de la pelagra (**FIGURA 34-2b**), así como trastornos del sistema nervioso. El ácido fólico, otro tipo de vitamina B, es indispensable para sintetizar timina, un componente del DNA; una deficiencia de ácido fólico dificulta la división celular en todo el cuerpo. Como resulta evidente, es particularmente importante que las mujeres embarazadas consuman suficiente ácido fólico para facilitar el rápido crecimiento del feto. Una deficiencia de ácido fólico también causa una reducción en los glóbulos rojos y la anemia consecuente. Para que el ácido fólico funcione adecuadamente, se requieren pequeñas cantidades de vitamina B_{12}. En la dieta humana, la vitamina B_{12} se puede obtener sólo a partir de las proteínas de origen animal, por lo que los vegetarianos estrictos requieren tomar complementos de esta vitamina.

Vitaminas liposolubles

Las vitaminas solubles en lípidos A, D, E y K desempeñan papeles aún más variados (véase la tabla 34-3). La vitamina K, por ejemplo, ayuda a regular la coagulación de la sangre. Una deficiencia de vitamina A provoca ceguera nocturna porque se emplea en la producción de la molécula que capta la luz en la retina. La vitamina D es indispensable para la formación normal de los huesos; una deficiencia de esta vitamina puede provocar raquitismo (véase la **FIGURA 34-2c**). Investigadores estadounidenses descubrieron recientemente que muchas mujeres adultas, especialmente aquellas con piel oscura que no pueden sintetizar mucha vitamina D en presencia de luz solar, tienen niveles inadecuados de esta vitamina. Los hijos de madres que tienen una deficiencia de vitamina D están en alto riesgo de padecer raquitismo, cuya prevalencia se está incrementando en Estados Unidos. Las vitaminas liposolubles se pueden almacenar en la grasa corporal y podrían acumularse en el cuerpo con el tiempo. Por ello, algunas de estas vitaminas (como la A, por ejemplo) podrían ser tóxicas si se consumen en dosis excesivas.

Dos terceras partes del cuerpo humano se componen de agua

ye aproximadamente el 10 por ciento de las necesidades promedio, mientras que el resto se obtiene de ingestión de líquidos. El agua en exceso se excreta a través de la orina.

Ciertas pautas nutricionales ayudan a obtener una dieta equilibrada

Casi todos quienes viven en países desarrollados tienen la suerte de contar con abundante comida. Sin embargo, la abrumadora diversidad de alimentos que se venden en un supermercado típico en uno de esos países y la amplia disponibilidad de "comida rápida" contribuyen a la obesidad y a una nutrición deficiente. Para ayudar a la gente a tomar decisiones informadas, el gobierno de Estados Unidos ha establecido ciertas pautas nutricionales, bajo el nombre de "Mi pirámide", que se pueden consultar en un sitio Web interactivo. El sitio Web, que presenta 12 conjuntos individualizados de recomendaciones nutricionales, es un buen punto de partida para la pirámide de la alimentación familiar. Consúltala bajo el nombre "mypiramid" en un motor de búsqueda de Internet.

Otra fuente de información es la etiqueta con información nutricional que ahora se exige en muchos países para los alimentos envasados comercialmente. Esta etiqueta ofrece información completa en cuanto a contenido de calorías, fibra, lípidos, azúcares y vitaminas (**FIGURA 34-3**). Algunas cadenas de expendios de comida rápida entregan volantes que detallan la información nutrimental de sus productos.

DATOS DE NUTRICIÓN

Tamaño de porción	1 taza (55 g)
Porciones por envase	8
Cantidad por porción	
Calorías 210	Calorías de grasa 0
	Valor diario (porcentaje)
Grasa total 0 g	0 %
Grasa saturada 0 g	0%
Colesterol 0 mg	0 %
Sodio 20 mg	1 %
Carbohidratos totales 46 g	15%
Fibra alimenticia 6 g	24%
Azúcares 12 g	
Proteínas 6 g	
Vitamina A* •	Vitamina C 2 %
Calcio 4 % •	Hierro 18%
Tiamina 38% •	

* Los valores diarios porcentuales se basan en una dieta de 2000 Calorías y podrían ser más altos o bajos dependiendo de sus necesidades calóricas.

	Calorías	2000	2500
Grasa total	Menos de	65 g	80 g
Grasa saturada	Menos de	20 g	25 g
Colesterol	Menos de	300 mg	300 mg
Sodio	Menos de	2400 mg	2400 mg
Carbohidratos totales		300 g	375 g
Fibra alimenticia		25 g	30 g

Calorías por gramo:
Grasa 9 • Carbohidrato 4 • Proteína 4

FIGURA 34-3 **Etiqueta completa de alimentos**

34.2 ¿CÓMO SE EFECTÚA LA DIGESTIÓN?

Generalidades de la digestión

Después de una comida, es común oír que el estómago hace ruido. La causa es una de las diversas fases de la digestión. **Digestión** es el proceso de trituración física seguida del desdoblamiento químico de los alimentos. El **sistema digestivo** de los animales acepta y luego digiere las complejas moléculas de sus alimentos para convertirlas en moléculas más sencillas susceptibles de absorberse. El material que no puede aprovecharse o desdoblarse se expulsa del cuerpo.

Los animales comen los cuerpos de otros organismos, los cuales a menudo oponen resistencia a convertirse en alimento. Las plantas, por ejemplo, protegen sus células individuales con una pared de celulosa no digerible. Los cuerpos de los animales pueden estar cubiertos por pelo, escamas o plumas que tampoco pueden digerirse. Además, los complejos lípidos, carbohidratos y proteínas de los alimentos no se encuentran en una forma que se pueda utilizar directamente. Los nutrimentos deben desdoblarse para que puedan absorberse y distribuirse a las células del animal que los consumió, donde se recombinan en formas singulares. Los diferentes tipos de animales enfrentan el reto de adquirir nutrimentos con diferentes tipos de tractos digestivos, cada uno perfectamente adaptado a una dieta y estilo de vida característicos. No obstante, dentro de esta diversidad hay ciertas tareas que todos los sistemas digestivos deben realizar:

1. *Ingestión.* La comida se debe introducir en el tracto digestivo a través de una abertura, generalmente llamada **boca**.
2. *Desdoblamiento mecánico.* La comida se debe dividir físicamente en fragmentos más pequeños. Esto se logra con mollejas o dientes, además de la acción de batido del tracto digestivo. Las partículas producidas por el desdoblamiento mecánico presentan una mayor área superficial para el ataque eficaz de las enzimas digestivas.
3. *Desdoblamiento químico.* Las partículas de alimento deben exponerse a enzimas digestivas y otros líquidos digestivos que desdoblan las moléculas grandes en subunidades más pequeñas.
4. *Absorción.* Las moléculas pequeñas deben ser transportadas fuera de la cavidad digestiva e introducirse en las células.
5. *Eliminación. Los* materiales no digeribles se deben expulsar del cuerpo.

En los siguientes apartados exploraremos algunos de los mecanismos de los sistemas digestivos de los animales para realizar estas funciones. Desde una perspectiva simplificada, los animales son máquinas que convierten el alimento en más animales, en tanto que éste les permite renovar sus cuerpos y reproducirse. La selección natural ha producido comportamientos y adaptaciones digestivas que permiten a los animales adquirir los nutrimentos de la variedad de ambientes en los que habitan y sacar provecho de casi toda fuente posible de alimento.

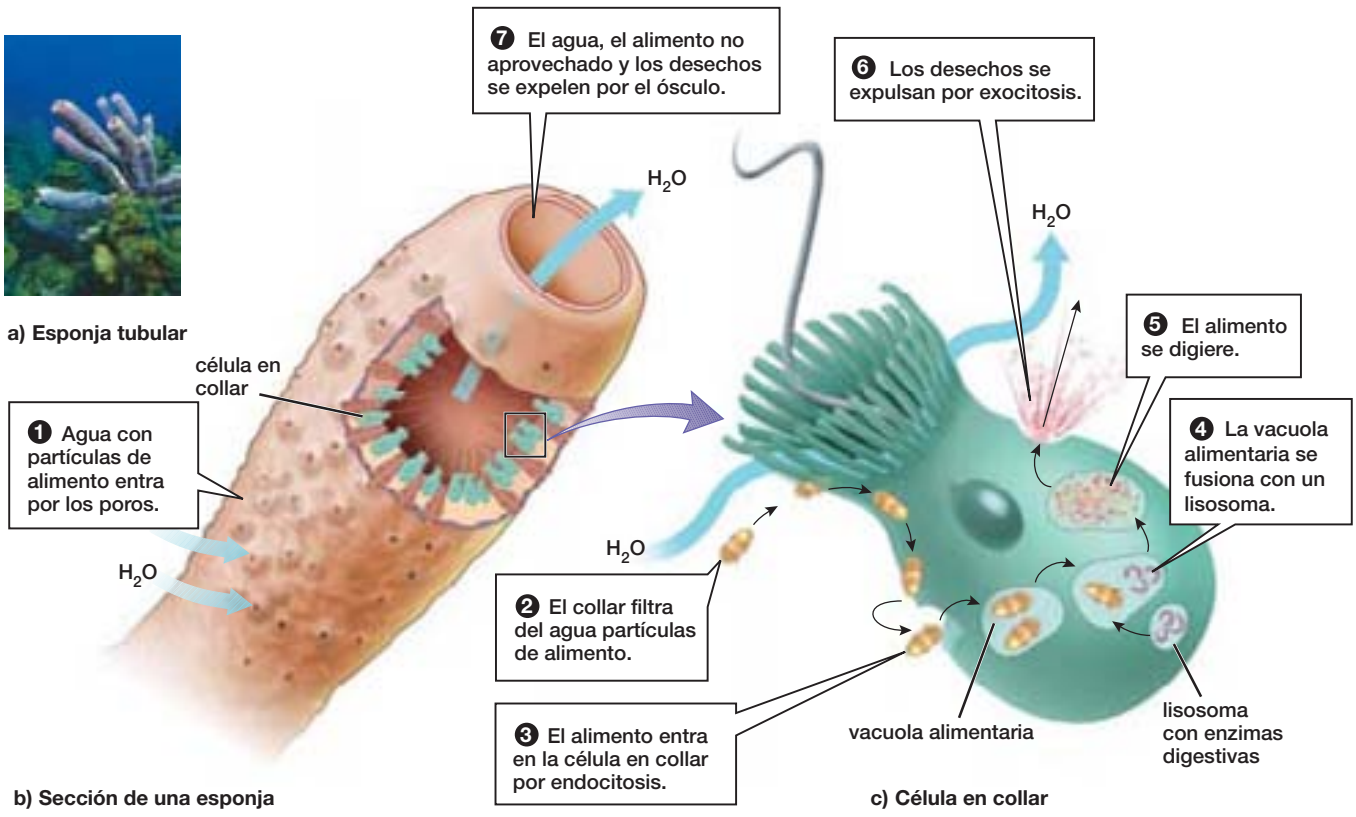

a) Esponja tubular
célula en collar
❶ Agua con partículas de alimento entra por los poros.
H2O
H2O
❷ El collar filtra del agua partículas de alimento.
❸ El alimento entra en la célula en collar por endocitosis.
❼ El agua, el alimento no aprovechado y los desechos se expelen por el ósculo.
H2O
❻ Los desechos se expulsan por exocitosis.
❺ El alimento se digiere.
❹ La vacuola alimentaria se fusiona con un lisosoma.
vacuola alimentaria
lisosoma con enzimas digestivas
b) Sección de una esponja
c) Célula en collar

FIGURA 34-4 Digestión intracelular en una esponja

Esponjas fotografiadas en el mar de las islas Vírgenes. ***b)*** Anatomía de una esponja simple; se muestra la dirección de flujo del agua y la ubicación de las células en collar. ***c)*** Ampliación de una sola célula en collar que muestra la digestión de organismos unicelulares, los cuales se filtran del agua, quedan atrapados en el exterior del collar, son engullidos y luego se digieren.

En las esponjas la digestión se efectúa dentro de células individuales

Las esponjas son los únicos animales que dependen exclusivamente de sus células individuales para digerir el alimento mediante la **digestión intracelular**. Como cabe esperar, esto limita su alimento a organismos microscópicos o partículas. Las esponjas se adhieren de forma permanente a las rocas, haciendo circular el agua del mar a través de los poros en sus cuerpos. Como se observa en la FIGURA 34-4, *células en collar* especializadas o *coanocitos* dentro de la esponja filtran organismos microscópicos del agua y los ingieren mediante el proceso de fagocitosis (término que significa "comer células"; véase el capítulo 5). Una vez ingerido por la célula, el alimento se introduce en una **vacuola alimentaria**, un espacio rodeado por una membrana que actúa como estómago temporal. La vacuola se fusiona con pequeñas vesículas que contienen enzimas digestivas llamadas **lisosomas** y el alimento se desdobla dentro de la vacuola para producir moléculas más pequeñas que el citoplasma celular puede absorber. Los residuos no digeridos permanecen en la vacuola, que finalmente expulsa su contenido al mar mediante el proceso de exocitosis.

Una bolsa con una abertura es el sistema digestivo más simple

Los organismos más grandes y complejos desarrollaron una cámara dentro del cuerpo donde trozos de comida se desdoblan por la acción de enzimas que actúan fuera de las células. Este proceso se llama **digestión extracelular**. Una de las más sencillas de esas cámaras se encuentra en los celentéreos (cnidarios) como las anémonas de mar, las hidras y las medusas. Estos animales poseen una bolsa digestiva llamada **cavidad gastrovascular**, con una sola abertura por la que se ingieren los alimentos y se expulsan los desechos (FIGURA 34-5). Los tentáculos urticantes del animal atrapan alimento (como una "pulga acuática", que es un crustáceo) y lo llevan a través de la boca a la cavidad gastrovascular. Las células glandulares que revisten la cavidad secretan enzimas que inician la digestión de la presa. Las células nutricionales que revisten esa misma cavidad absorben los nutrimentos y rodean partículas pequeñas de alimento mediante fagocitosis. La digestión ulterior es intracelular, dentro de las vacuolas alimentarias en las células nutricionales. Los residuos no digeridos se expulsan finalmente por la boca, de manera que sólo es posible procesar un alimento a la vez.

La digestión en un tubo permite a los animales alimentarse con mayor frecuencia

Un sistema digestivo con forma de bolsa es inadecuado para animales activos que deben alimentarse con frecuencia, o para aquellos cuyo alimento ofrece tan poca nutrición que deben alimentarse continuamente. Las necesidades de estos animales se satisfacen con un sistema digestivo consistente en un tubo de una sola vía dividido en una serie de compartimientos y con una abertura en cada extremo. Un sistema digestivo tubular permite al animal comer con frecuencia, porque los desechos no interfieren con la ingesta de alimento. La mayoría de los animales, incluidos todos los vertebrados e invertebrados como las lombrices de tierra, los moluscos, artrópodos y equinodermos tienen sistemas digestivos que, en esencia, son tubos que comienzan en la boca y terminan en el ano. Además, ese sistema consta de una serie de regiones especializadas que procesan los alimentos en cierto orden: primero los trituran físicamente, luego los desdoblan mediante la acción de enzimas utilizando la digestión extracelular, y después absorben los nutrimentos para introducirlos en el cuerpo.

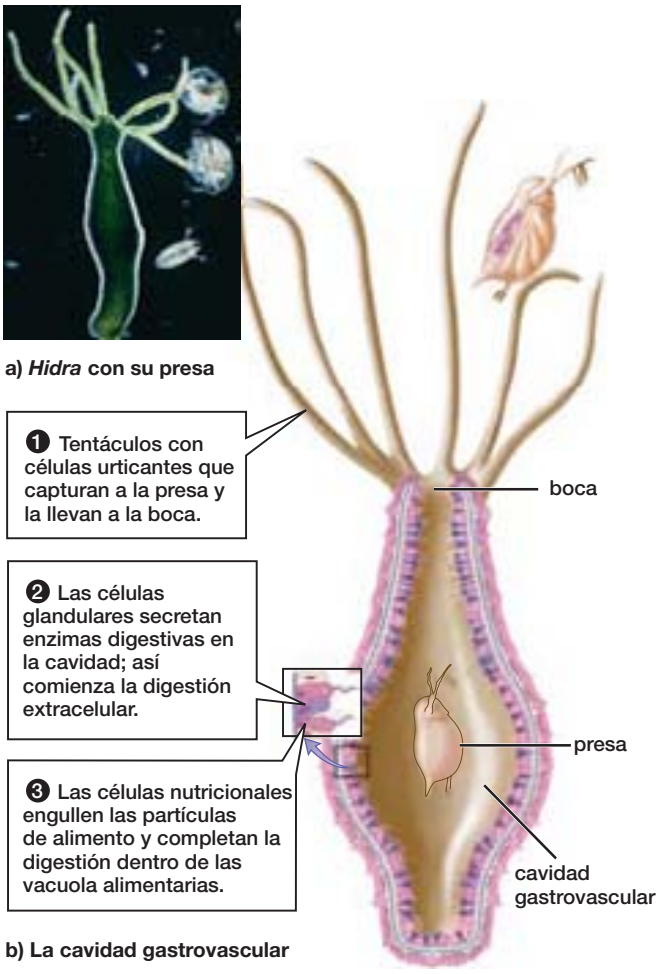

a) *Hidra* con su presa
❶ Tentáculos con células urticantes que capturan a la presa y la llevan a la boca.
❷ Las células glandulares secretan enzimas digestivas en la cavidad; así comienza la digestión extracelular.
❸ Las células nutricionales engullen las partículas de alimento y completan la digestión dentro de las vacuola alimentarias.
boca
presa
cavidad gastrovascular
b) La cavidad gastrovascular

FIGURA 34-5 Digestión en una bolsa
a) Una hidra acaba de capturar e ingerir un diminuto crustáceo. ***b)*** Después del proceso descrito, los desechos (el material no digerido) se expulsan a través de la boca.

Especializaciones digestivas

Los sistemas digestivos tubulares permiten a diferentes tipos de animales comer una amplia variedad de alimentos y extraer de ellos la máxima cantidad de nutrimentos. Los **carnívoros**, como lobos, gatos, focas y aves depredadoras, se alimentan de otros animales. Los **herbívoros** se alimentan sólo de plantas; entre ellos se incluyen las aves que se alimentan de semillas, animales que pastan como los ciervos, camellos y vacas, y muchos roedores como los ratones. Los seres humanos, al igual que los osos y los mapaches, son **omnívoros** porque están adaptados para digerir alimentos tanto de origen animal como vegetal.

Ciertas adaptaciones permiten a los rumiantes digerir la celulosa

La celulosa que rodea cada planta es potencialmente una de las fuentes de energía alimentaria más abundantes del planeta; no obstante, si los seres humanos tuviéramos una dieta res-

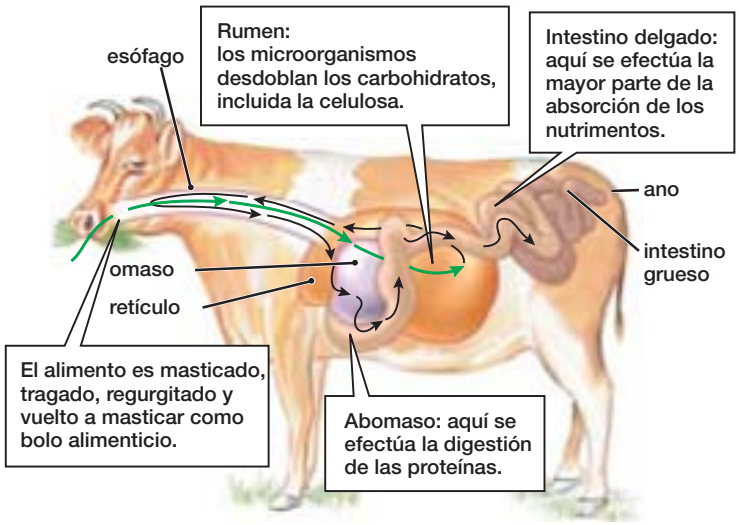


FIGURA 34-6 El sistema digestivo de los rumiantes
Las flechas indican la trayectoria del alimento en el tracto digestivo. PREGUNTA: Además de la capacidad para digerir celulosa, ¿qué otros beneficios nutricionales obtienen los rumiantes al tener microorganismos en sus intestinos?

tringida de pasto, como las vacas, pronto moriríamos de hambre. La celulosa, al igual que el almidón, consiste en largas cadenas de moléculas de glucosa, pero estas moléculas están unidas de forma que resisten el ataque de las enzimas digestivas animales. Los animales **rumiantes** —vacas, ovejas, cabras, camellos e hipopótamos, entre muchos otros— han desarrollado complejos sistemas digestivos que albergan microorganismos capaces de desdoblar la celulosa. La *rumia* es el proceso de regurgitación de los alimentos para volver a masticarlos y es una de diversas adaptaciones que permiten a estos animales digerir el duro material de las plantas. El estómago de los rumiantes consta de varias cámaras (**FIGURA 34-6**). La primera es el *rumen*, una gran tina de fermentación; el rumen de una vaca puede contener casi 40 galones (unos 150 litros). Esta cámara alberga muchas especies de bacterias y otros tipos de microorganismos. Además de digerir los azúcares y almidones de las plantas, estos microorganismos producen **celulasa**, una enzima que desdobla la celulosa en los azúcares que la componen. Después de procesarse en el rumen, el material vegetal entra en el *retículo* y adopta la forma de masa llamada *bolo alimenticio*. Este último es regurgitado, masticado y tragado para pasar de nuevo al rumen. La masticación adicional expone mayor cantidad de celulosa y el contenido celular a los microorganismos del rumen, los cuales lo digieren aún más. Gradualmente, el material vegetal digerido de forma parcial y los microorganismos son liberados hacia las cámaras restantes, pasa a través del estrecho *omaso* y luego al *abomaso* de mayores dimensiones, donde se efectúa la digestión de las proteínas. Aquí la vaca digiere no sólo las proteínas de la planta, sino también los microorganismos de su rumen. Luego, la vaca absorbe la mayor parte de los productos de la digestión a través de las paredes de su intestino delgado.

La longitud del intestino delgado está correlacionada con la dieta

nas son relativamente más fáciles de digerir y la digestión de las proteínas comienza en el estómago. El desarrollo de la rana constituye un ejemplo sorprendente de ello. El joven renacuajo es un herbívoro que se alimenta de algas y tiene un intestino largo. Cuando sufre la metamorfosis para convertirse en una rana adulta carnívora (que se alimenta de insectos), el intestino se acorta a un tercio de su longitud anterior.

Los dientes se adaptan a diferentes dietas

Los dientes se adaptan a la dieta. La dieta omnívora de los seres humanos ha seleccionado los incisivos delgados para morder, los colmillos o caninos para desgarrar, los premolares para triturar y los molares para moler y masticar (**FIGURA 34-7a**). Si tienes un perro, observa con atención su boca. Los carnívoros tienen pequeños incisivos, pero colmillos grandes para cortar y desgarrar la carne. Tienen un conjunto reducido de molares y premolares con orillas filosas especializadas para cortar los tendones y los huesos (**FIGURA 34-7b**). Los herbívoros como los caballos tienen caninos reducidos, y sus incisivos están adaptados para cortar hojas. También tienen premolares y molares anchos y planos capaces de triturar plantas duras que contienen celulosa (**FIGURA 34-7c**). Muchos herbívoros tienen dientes que crecen continuamente a lo largo de sus vidas para compensar el desgaste.

Las aves tienen mollejas para triturar el alimento

Las aves carecen de dientes y degluten su alimento entero, el cual pasa a través del esófago musculoso y tubular. En las aves que se alimentan de semillas, el alimento se almacena y se suaviza por la acción del agua en el buche expansible. Luego, el alimento pasa gradualmente al estómago dividido en dos partes (**FIGURA 34-8**). La primera secreta enzimas que digieren proteínas, mientras que la segunda está modificada en una *molleja*

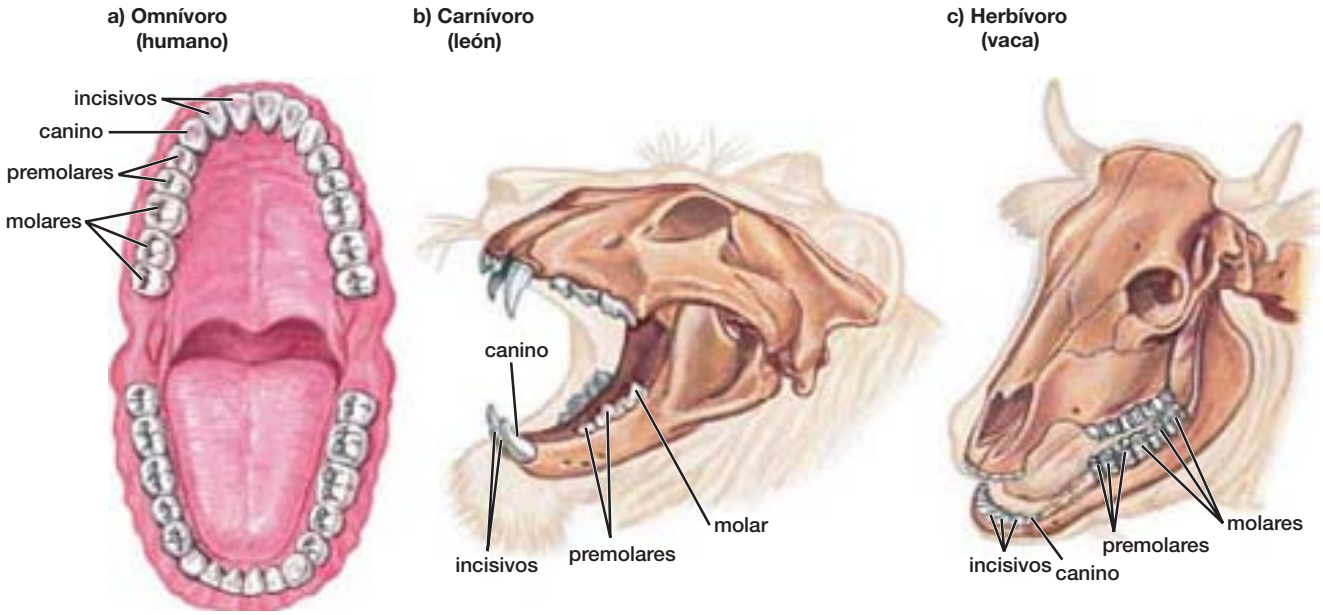


FIGURA 34-7 **Los dientes evolucionaron para adaptarse a diferentes dietas**

tión ocurre ahí. Los nutrimentos son absorbidos en el intestino delgado. El intestino grueso es extremadamente delgado y desemboca en la *cloaca*, una cámara para propósitos múltiples que sirve a los sistemas urinario, reproductor y digestivo.

34.3 ¿CÓMO DIGIEREN LOS ALIMENTOS LOS SERES HUMANOS?

El aparato digestivo humano (FIGURA 34-9), que está adaptado para procesar una amplia variedad de alimentos en nuestra dieta omnívora, es un buen ejemplo del sistema digestivo de los mamíferos. El alimento viaja por un tubo continuo desde la boca al ano; a lo largo de esta tortuosa ruta, se le somete a una serie muy bien orquestada de operaciones digestivas. Para cuando llega al final del camino, el alimento ha sido picado, molido, mezclado, revuelto y bañado por una serie de potentes sustancias químicas. Casi todo el valor nutricional se ha extraído y absorbido, en tanto que el residuo se expulsa. Este desdoblamiento por pasos de los alimentos requiere acciones coordinadas por parte del conjunto integrado de estructuras que constituyen el aparato digestivo.

El desdoblamiento mecánico y químico de los alimentos se inicia en la boca

Tomamos un bocado, la boca se humedece y comenzamos a masticar. Esto inicia el desdoblamiento tanto mecánico como químico del alimento. En el ser humano y otros mamíferos, los dientes realizan casi todo el trabajo mecánico. Los *incisivos,* al frente de la boca, cortan trozos de alimento; los puntiagudos *caninos* que los flanquean sirven para desgarrar los trozos; los *premolares* y *molares* en la parte posterior de la cavidad bucal tienen superficies planas para triturar el alimento y convertirlo en una pasta (véase la figura 34-7). En el ser humano adulto, 32 dientes de diversas formas y tamaños cortan y trituran el alimento para desbaratarlo.

Mientras los dientes pulverizan el alimento, se efectúa la primera fase de la digestión química cuando tres pares de glándulas salivales secretan saliva en respuesta al olor, la sensación y el sabor de los alimentos; si tenemos hambre, se produce saliva incluso por el solo hecho de pensar en comida. Juntas, nuestras glándulas salivales producen entre 1.0 y 1.5 litros de saliva diariamente. La saliva contiene la enzima digestiva **amilasa**, que inicia el desdoblamiento de almidones en compuestos más simples como los disacáridos (tabla 34-4), aunque también tiene otras funciones: contiene anticuerpos que protegen contra infecciones y una enzima que mata bacterias. La saliva también lubrica el alimento para facilitar la deglución y disuelve algunas moléculas alimenticias, como ácidos y azúcares, llevándolas a las *papilas gustativas* de la

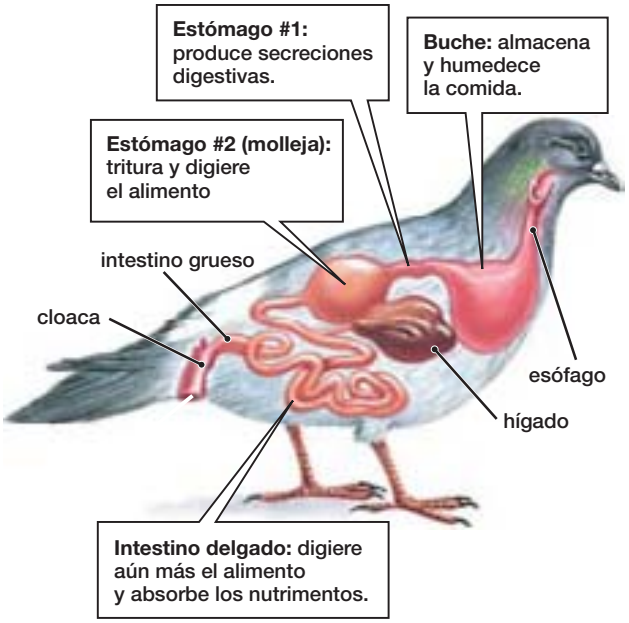

Estómago #1: produce secreciones digestivas.
Buche: almacena y humedece la comida.
Estómago #2 (molleja): tritura y digiere el alimento
intestino grueso
cloaca
esófago
hígado
Intestino delgado: digiere aún más el alimento y absorbe los nutrimentos.

FIGURA 34-8 **Adaptaciones digestivas en un ave**
PREGUNTA: ¿Cómo pueden triturar las aves su alimento si carecen de dientes?

FIGURA 34-9 El tracto digestivo humano

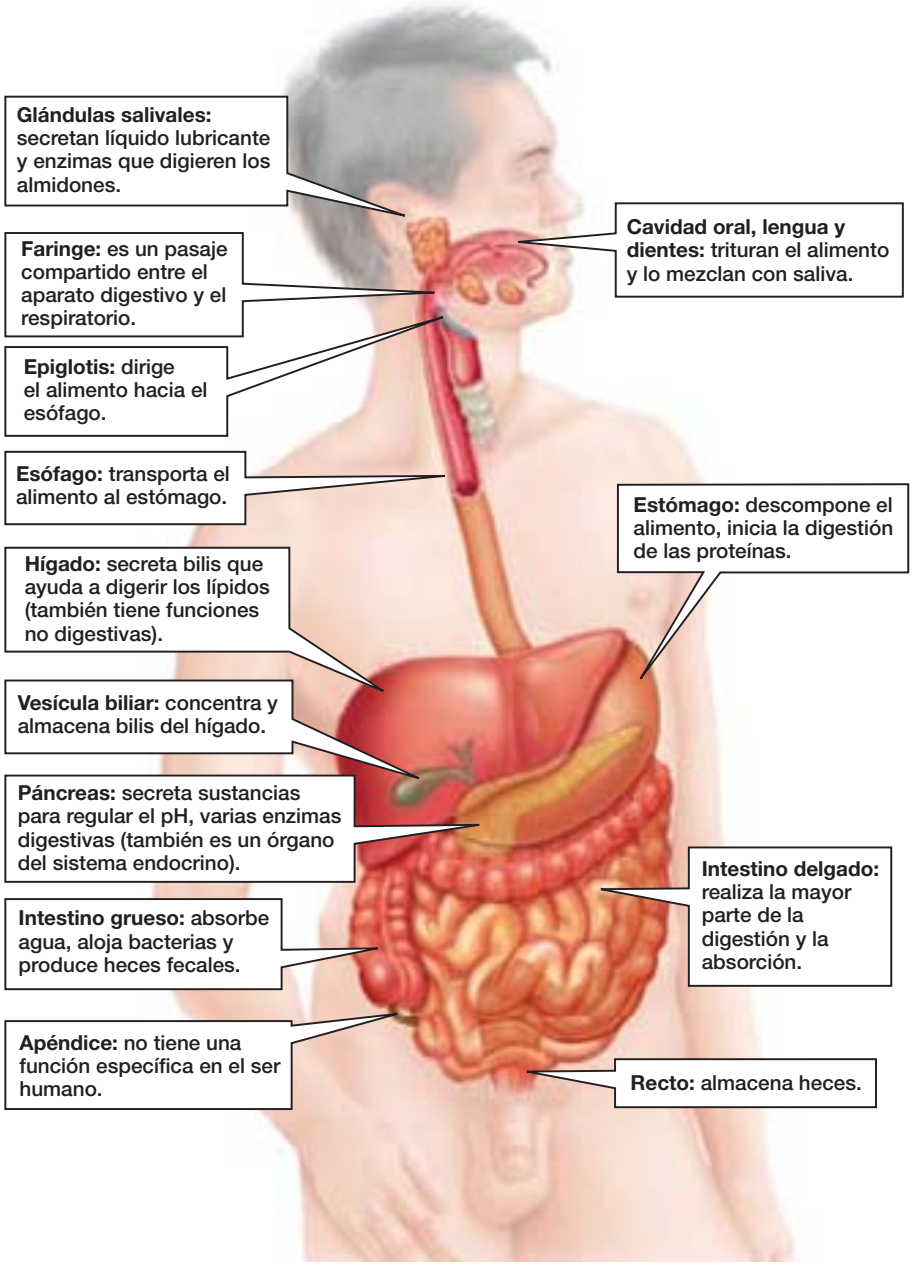
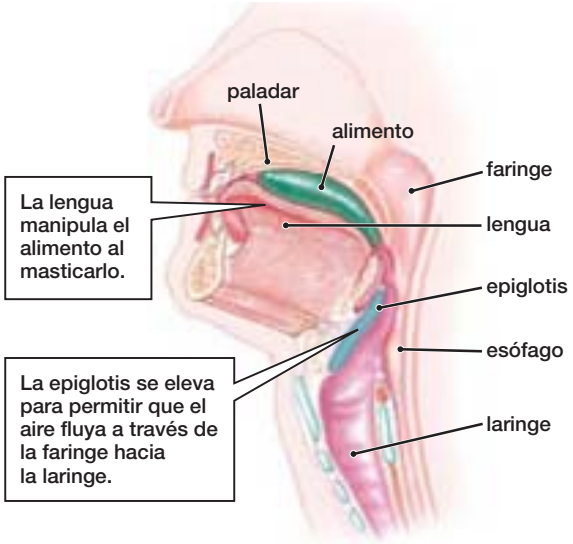
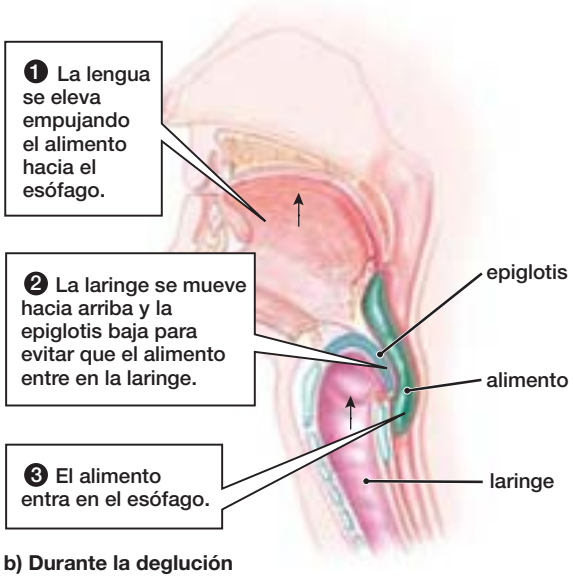

Glándulas salivales: secretan líquido lubricante y enzimas que digieren los almidones.
Faringe: es un pasaje compartido entre el aparato digestivo y el respiratorio.
Epiglotis: dirige el alimento hacia el esófago.
Esófago: transporta el alimento al estómago.
Hígado: secreta bilis que ayuda a digerir los lípidos (también tiene funciones no digestivas).
Vesícula biliar: concentra y almacena bilis del hígado.
Páncreas: secreta sustancias para regular el pH, varias enzimas digestivas (también es un órgano del sistema endocrino).
Intestino grueso: absorbe agua, aloja bacterias y produce heces fecales.
Apéndice: no tiene una función específica en el ser humano.
Cavidad oral, lengua y dientes: trituran el alimento y lo mezclan con saliva.
Estómago: descompone el alimento, inicia la digestión de las proteínas.
Intestino delgado: realiza la mayor parte de la digestión y la absorción.
Recto: almacena heces.

Tabla 34-4 Secreciones digestivas y sus fuentes

Sitio de digestión	Secreción	Origen de la secreción	Papel en la digestión
Boca	Amilasa	Glándulas salivales	Desdobla el almidón en disacáridos
	Moco, agua	Glándulas salivales	Lubrica y disuelve los alimentos
Estómago	Ácido clorhídrico	Células que revisten el estómago	Permite que actúe la pepsina, mata bacterias, ayuda en la absorción de minerales
	Pepsina	Células que revisten el estómago	Desdobla proteínas en péptidos grandes
	Moco	Células que revisten el estómago	Protege al estómago de digerirse a sí mismo
Intestino delgado	Bicarbonato de sodio	Páncreas	Neutraliza el quimo ácido del estómago
	Amilasa pancreática	Páncreas	Desdobla el almidón en disacáridos
	Proteasas como la tripsina, quimiotripsina y carboxipeptidasa	Páncreas	Desdobla proteínas en dipéptidos
	Lipasa	Páncreas	Desdobla lípidos en ácidos grasos y glicerol
	Bilis	Hígado	Emulsifica lípidos
	Peptidasas	Intestino delgado	Divide péptidos pequeños en aminoácidos
	Disacaridasas	Intestino delgado	Divide disacáridos en monosacáridos
	Moco	Intestino delgado	Protege el intestino de secreciones digestivas



a) Antes de la deglución


❶ La lengua se eleva empujando el alimento hacia el esófago.
❷ La laringe se mueve hacia arriba y la epiglotis baja para evitar que el alimento entre en la laringe.
❸ El alimento entra en el esófago.
epiglotis
alimento
laringe

b) Durante la deglución

FIGURA 34-10 El reto de la deglución
a) La deglución es un proceso complicado por el hecho de que tanto el esófago (parte del aparato digestivo) como la laringe (que pertenece al aparato respiratorio) se comunican con la faringe. ***b)*** Durante la deglución, la laringe se desplaza hacia arriba, quedando por debajo de una pequeña tapa cartilaginosa, la epiglotis. Ésta se dobla hacia abajo sobre la laringe, sella la abertura al aparato respiratorio y dirige el alimento hacia el esófago.

lengua. Éstas son receptores sensoriales que ayudan a identificar el tipo y la calidad del alimento.

Con la ayuda de los músculos de la lengua, se forma un bolo con el alimento, el cual se empuja hacia atrás a la **faringe**, una cavidad muscular que conecta la boca con el esófago (FIGURA 34-10a greso de alimento en la faringe) eleva la laringe de modo que se pegue a la **epiglotis,** una tapa de tejido que bloquea los conductos respiratorios dirigiendo el alimento hacia el esófago (FIGURA 34-10b).

El esófago conduce los alimentos al estómago

La deglución arrastra el alimento al esófago, un tubo musculoso que impele la masa alimenticia hacia el estómago. El moco que secretan las células que revisten el esófago ayuda a protegerlo de la abrasión y también lubrica el alimento durante su paso por él. Los músculos que rodean al esófago producen una serie de contracciones que se inician justo arriba de la masa deglutida y progresan hacia el esófago, forzando al alimento hacia el estómago. Esta acción muscular, llamada **peristaltismo**, también se efectúa a lo largo de todo el tracto digestivo (FIGURA 34-11) ayudando a que el alimento avance por el esófago, el estómago, los intestinos y finalmente hacia fuera por el ano. El peristaltismo es tan eficaz que una persona puede deglutir alimento aunque esté de cabeza.

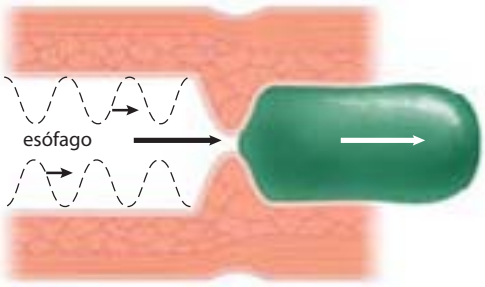
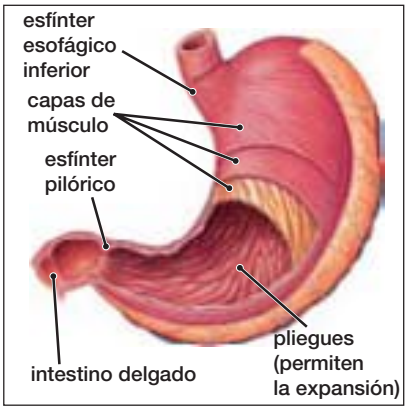


FIGURA 34-11 Peristaltismo

El **estómago** humano es una bolsa muscular expansible. Su capacidad en estado confortable es aproximadamente de un litro en un adulto, pero esto varía en función del tamaño del cuerpo. El alimento se retiene en el estómago mediante dos anillos de músculo circular (*esfínteres*). El esfínter en la unión entre el esófago y el estómago, llamado *esfínter esofágico inferior* (FIGURA 34-12), evita que el alimento y las secreciones estomacales ácidas suban hacia el esófago mientras el estómago se agita. Si el esfínter esofágico inferior se debilita, se produce *reflujo ácido* porque los ácidos del estómago entran al esófago y atacan su revestimiento sin protección. Un segundo esfínter, el *esfínter pilórico*, separa la porción inferior del estómago de la parte superior del intestino delgado. Este músculo regula el paso del alimento al intestino delgado, como explicaremos más adelante.



El estómago tiene tres funciones principales. La primera es almacenar el alimento y dejarlo pasar gradualmente al intestino delgado, a un ritmo apropiado para una digestión y absorción correctas. Los pliegues de la pared del estómago (véase la figura 34-12) aumentan su capacidad y permiten ingerir comidas abundantes y espaciadas. Los carnívoros llevan esta facultad hasta el extremo. Un león, por ejemplo, puede consumir unos 18 kilogramos de carne en una sola comida y dedicar los días siguientes a digerirla con calma. Una segunda función del estómago es contribuir al desdoblamiento mecánico del alimento; sus paredes musculares producen movimientos de contracción y batido, ayudando así a separar los trozos grandes de alimento.

La tercera función del estómago es el desdoblamiento químico del alimento. El revestimiento del estómago contiene grupos de células llamadas *glándulas gástricas* que incluyen varios tipos de células. Las glándulas gástricas secretan pepsinógeno, ácido clorhídrico (HCl) y moco. En el estómago se inicia la digestión de las proteínas. El *pepsinógeno* es una forma inactiva de la enzima *pepsina*. La pepsina es una **proteasa**, esto es, una enzima que desdobla las proteínas en cadenas más cortas de aminoácidos llamadas *péptidos* (véase la tabla 34-4). La pepsina se secreta en la forma de pepsinógeno para evitar que digiera las células mismas que la producen. El ácido clorhídrico, que confiere al jugo gástrico un pH de 1 a 3, convierte el pepsinógeno en pepsina, la cual funciona de manera óptima en un ambiente ácido. El ácido estomacal también promueve la absorción del calcio y el hierro; además, mata muchas bacterias presentes en los alimentos.

Como podemos ver, el estómago produce todos los ingredientes necesarios para digerirse a sí mismo. De hecho, esto es lo que sucede cuando una persona padece úlceras (véase "Guardián de la salud: Las úlceras digieren el tracto digestivo"). Sin embargo, las células que revisten el estómago normalmente producen una gran cantidad de moco espeso que cubre el revestimiento de este órgano y actúa como barrera contra la autodigestión. Esta protección no es perfecta; las células que recubren la parte interna del estómago sufren cierto grado de digestión y deben remplazarse luego de unos cuantos días.

En el estómago, los alimentos se convierten gradualmente en un líquido espeso y ácido llamado **quimo**, que consiste en alimento parcialmente digerido y secreciones digestivas. Luego, ondas peristálticas (unas tres por minuto) empujan al quimo hacia el intestino delgado. El esfínter pilórico sólo permite que pase una pequeña cantidad de quimo (aproximadamente, lo equivalente a una cucharadita) con cada contracción. Dependiendo de la cantidad de comida y del tipo de alimento ingerido, se necesitan entre dos y seis horas para vaciar totalmente el estómago después de una comida de alimentos sólidos. Los movimientos continuos de batido que realiza el estómago vacío se sienten como "retortijones de hambre".

Sólo unas cuantas sustancias, entre ellas algunos fármacos y el alcohol, pueden ingresar en el torrente sanguíneo a través de la pared estomacal. Dado que la presencia de alimentos en el estómago hace más lenta la absorción del alcohol, la recomendación de "no beber con el estómago vacío" se basa en principios fisiológicos sólidos.

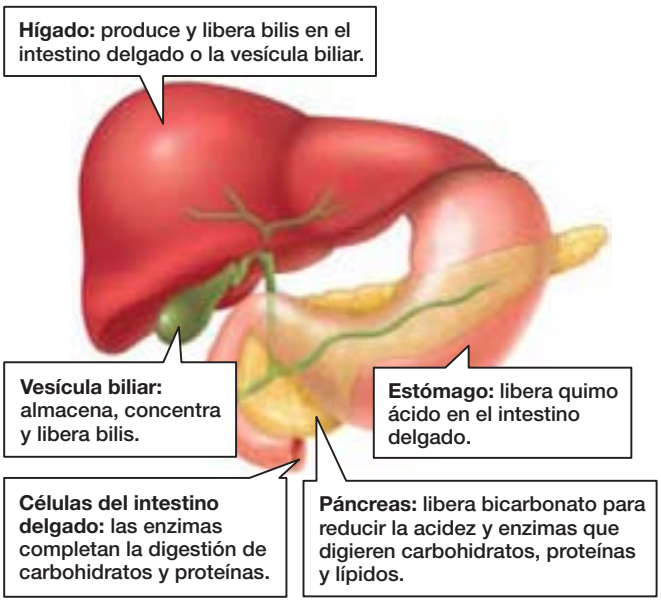
Casi toda la digestión se efectúa en el intestino delgado

El **intestino delgado** del tracto digestivo, pues mide unos 3 metros de longitud (los reportes de intestinos delgados de seis metros de longitud se basan en medidas de cadáveres en los que todos los músculos han perdido el tono). Las funciones del intestino delgado son digerir alimento para convertirlo en pequeñas moléculas y absorber éstas para transferirlas al torrente sanguíneo. La digestión dentro del intestino delgado se efectúa con la ayuda de secreciones digestivas de tres fuentes: el hígado, el páncreas y las células del intestino delgado mismo (**FIGURA 34-13**). El intestino delgado completa la digestión de carbohidratos que se inició en la boca y la digestión de proteínas que comenzó en el estómago. Además, toda la digestión de los lípidos se realiza en el intestino delgado.

El hígado y la vesícula biliar aportan bilis, que es importante para desdoblar los lípidos

El **hígado** es quizá el órgano más versátil del cuerpo. Entre sus muchas funciones están el almacenamiento de lípidos y carbohidratos para obtener energía, la síntesis de proteínas de la sangre, el almacenamiento de hierro y determinadas vitaminas, la conversión del amoniaco tóxico (liberado por el desdoblamiento de aminoácidos) en **urea** y la desintoxicación de otras sustancias dañinas como la nicotina y el alcohol. El papel del hígado en la digestión es la producción de *bilis,* un líquido que se almacena y se concentra en la **vesícula biliar** y se libera al intestino delgado a través de un tubo llamado *conducto biliar* (véase las figuras 34-9 y 34-13).

La **bilis** es una mezcla compleja formada por **sales biliares**, agua, otras sales y colesterol. Las sales biliares se sintetizan en el hígado a partir de colesterol y aminoácidos. Aunque ayudan a desdoblar los lípidos, las sales biliares no son enzimas. Tienen un extremo hidrofílico que es atraído por el agua, y un extremo hidrofóbico que interactúa con los lípidos. Como resultado, las sales biliares dispersan los lípidos en partículas microscópicas en el quimo acuoso, al igual que un detergente remueve la grasa de una sartén. Las partículas de lípidos son atacadas fácilmente por las **lipasas**, enzimas que el páncreas produce para la digestión de lípidos.


Hígado: produce y libera bilis en el intestino delgado o la vesícula biliar.
Vesícula biliar: almacena, concentra y libera bilis.
Estómago: libera quimo ácido en el intestino delgado.
Células del intestino delgado: las enzimas completan la digestión de carbohidratos y proteínas.
Páncreas: libera bicarbonato para reducir la acidez y enzimas que digieren carbohidratos, proteínas y lípidos.

GUARDIÁN DE LA SALUD Las úlceras digieren el tracto digestivo

Las úlceras se presentan cuando áreas localizadas de las capas de tejido que revisten el estómago o la parte superior del intestino delgado se deterioran. Las víctimas de úlcera experimentan ardor en el área del estómago, así como vómitos y náuseas; en casos graves, aparece sangre en las heces por el sangrado que se produce al destruirse el tejido (**FIGURA E34-2**). Anteriormente los médicos creían que las úlceras eran provocadas por la sobreproducción de ácido (que se pensaba estaba relacionada con el estrés), y trataban a sus pacientes con antiácidos y programas de reducción del estrés. Sin embargo, ahora los Centros para el Control de Enfermedades reportan que la bacteria *Helicobacter pylori* causa entre el 80 y 90 por ciento de todas las úlceras y que los antibióticos adecuados (administrados en conjunción con medicamentos que reducen la acidez) pueden curar la mayoría de las úlceras. ¿Qué provocó este cambio en nuestra comprensión de las úlceras? En 1983 J. R. Warren, un patólogo australiano, observó que muestras de tejido estomacal inflamado estaban infectadas de manera consistente con una bacteria en forma de espiral. Warren trabajaba con Barry Marshall, un médico internista, con el objetivo de aislar y cultivar la bacteria, que tiempo después se llamaría *Helicobacter pylori*. Los investigadores sugirieron que la *H. pylori* causaba inflamación que con el tiempo se convertiría en úlcera; pero la comunidad médica se mostraba escéptica. ¿Cómo era posible que las bacterias pudieran sobrevivir y, más aún, prosperar en el ambiente ácido y capaz de digerir proteínas que prevalece en el estómago? Para probar su hipótesis, Marshall y otro voluntario ingirieron un lote de bacterias y tiempo después presentaron muestras de sus propios tejidos estomacales infectados con *H. pylori*. Posteriores investigaciones y estudios epidemiológicos apoyaron la hipótesis de Warren y Marshall; finalmente, estos investigadores recibieron el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 2005.

Ahora los científicos saben que la *Helicobacter pylori* coloniza la capa protectora de moco que recubre la pared estomacal, así como las paredes de la porción superior del intestino delgado. En el proceso, estas bacterias debilitan la capa de mucosidad e incrementan la producción de ácido por parte del estómago, haciendo que el recubrimiento de este último y de la parte superior del intestino se vuelva más susceptible al ataque de los ácidos y las enzimas que digieren las proteínas. La respuesta inmunitaria del cuerpo a la infección también contribuye a la destrucción de tejido. Es interesante hacer notar que, aunque aproximadamente la mitad de la población mundial alberga la *H. pylori*, la mayoría de las personas no padecen úlceras ni presentan síntomas obvios de infección.

Algunas úlceras son provocadas por otros factores, incluido el uso prolongado de analgésicos, como la aspirina o el ibuprofen, que interfieren con los mecanismos que protegen el estómago y las células intestinales de los ácidos y las enzimas digestivas. Otros factores que podrían agravar las úlceras y retardar su curación incluyen el tabaquismo, así como el consumo de cafeína y alcohol.

FIGURA E34-2 Una úlcera
Esta fotografía de una úlcera se tomó por medio de un dispositivo de observación a base de fibras ópticas, llamado endoscopio.

El páncreas suministra varias secreciones digestivas al intestino delgado

El **páncreas** está en la curva entre el estómago y el intestino delgado (véase la figura 34-10) y consta de dos tipos principales de células. Un tipo produce hormonas que intervienen en la regulación del azúcar en la sangre (como veremos más adelante, en el capítulo 37); el otro produce una secreción digestiva llamada **jugo pancreático**

Las enzimas digestivas pancreáticas desdoblan tres tipos principales de nutrimentos (véase la tabla 34-4): la amilasa desdobla carbohidratos, las lipasas digieren lípidos y varias proteasas desdoblan proteínas y péptidos.

Las células de la pared intestinal completan el proceso digestivo

La pared del intestino delgado está tapizada de células especializadas que completan el proceso digestivo y absorben las pequeñas moléculas que resultan. Estas células tienen diversas enzimas en su membrana externa, la cual constituye el revestimiento interior del intestino delgado. Entre esas enzimas se encuentran las *peptidasas*, que terminan de desdoblar los péptidos para convertirlos en aminoácidos, y *disacaridasas*, que desdoblan los disacáridos para obtener monosacáridos (véase el capítulo 3). Por ejemplo, la disacaridasa conocida como *lactasa*

que revisten el intestino delgado, esta fase final de la digestión tiene lugar *durante* la absorción de los nutrimentos por las células epiteliales. Al igual que en el estómago, grandes cantidades de secreciones mucosas de células especializadas en el revestimiento del intestino delgado protegen a este último contra la autodigestión.

Tal vez conozcas a alguien que tiene

y quien seguramente experimenta inflamación, espasmos y diarrea después de consumir leche. De hecho, muchos mamíferos —incluida la mayor parte de la población humana— producen grandes cantidades de lactasa durante la infancia, cuando la leche es el alimento primordial, pero producen una escasa cantidad de esta enzima cuando son adultos. Consideremos que, una vez transcurrida la infancia, la leche deja de estar disponible para los mamíferos; los seres humanos sólo comenzaron a tener acceso de nuevo a la leche luego de que domesticaron otros mamíferos. Los descendientes de europeos nórdicos y occidentales, en su mayoría y de manera inusual, continúan secretando lactasa durante la adultez.

Casi toda la absorción se efectúa en el intestino delgado

El recubrimiento del intestino ofrece una enorme área superficial para la absorción

El intestino delgado no sólo es el principal lugar donde se efectúa la digestión química, también es el principal sitio de **absorción** de nutrimentos a la sangre. El intestino delgado tiene numerosos pliegues y proyecciones, gracias a los cuales posee una área superficial interna unas 600 veces mayor que la de un tubo liso de la misma longitud (FIGURA 34-14a). Diminutas proyecciones cilíndricas llamadas **vellosidades** cubren toda la superficie plegada de la pared intestinal (FIGURA 34-14b). Las vellosidades, que miden aproximadamente un milímetro de longitud, hacen que a simple vista el revestimiento intestinal tenga un aspecto aterciopelado, y oscilan suavemente en el quimo que pasa por el intestino. Este movimiento aumenta su exposición a las moléculas que han de digerirse y absorberse. Las células epiteliales que cubren cada vellosidad tienen proyecciones microscópicas llamadas **microvellosidades** (FIGURA 34-14d). En conjunto, estas especializaciones del revestimiento del intestino delgado le confieren una enorme área superficial de unos 250 metros cuadrados (casi el tamaño de una cancha de tenis).

Contracciones no sincronizadas de los músculos circulares del intestino, llamadas **movimientos de segmentación**, revuelven el quimo hacia atrás y adelante, de forma que los nutrimentos entren en contacto con la superficie absorbente del intestino delgado. Cuando ya no hay más que absorber, ondas peristálticas coordinadas llevan el residuo al *intestino grueso.*

Los nutrimentos son transportados a través de la pared intestinal de diferentes maneras

Entre los nutrimentos que el intestino delgado absorbe están agua, monosacáridos, aminoácidos y péptidos cortos, ácidos grasos producidos por la digestión de lípidos, vitaminas y minerales. Los mecanismos por los que se efectúa esta absorción son variados y complejos; muchos nutrimentos se desplazan por medio de proteínas portadoras, ya sea por transporte activo o por difusión facilitada (como se describió en el capítulo 5).

Cada vellosidad del intestino delgado cuenta con un abasto abundante de capilares sanguíneos y un solo capilar linfático, llamado **quilífero**, para llevarse los nutrimentos absorbidos y distribuirlos por todo el cuerpo (FIGURA 34-14c). Casi todos los nutrimentos pasan a través de las células que revisten el intestino delgado y entran en la sangre por los capilares en las vellosidades, pero el glicerol y los ácidos grasos (producidos cuando la lipasa ataca a los triglicéridos) siguen una ruta distinta. Una vez que se difunden a las células que revisten el intestino delgado, estas subunidades de triglicéridos se ensamblan o sintetizan en partículas llamadas *quilomicrones*, que consisten en triglicéridos, colesterol y proteínas, que luego se liberan dentro de las vellosidades. Los quilomicrones,

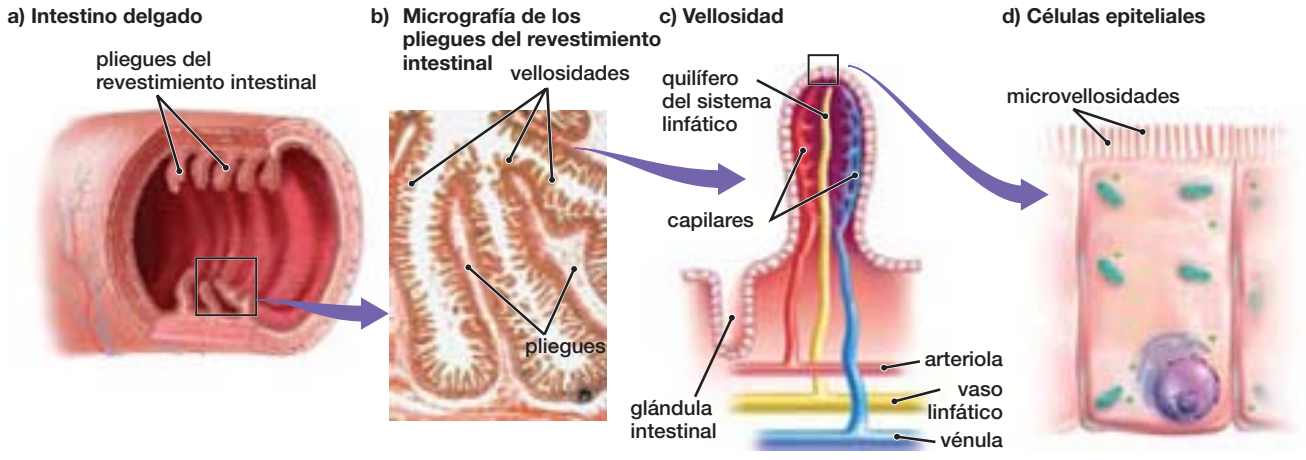


FIGURA 34-14 Estructura del intestino delgado

Los pliegues macroscópicos del revestimiento intestinal están recubiertos de ***b)*** diminutas proyecciones cilíndricas llamadas vellosidades, que se observan en esta micrografía como salientes de la membrana plegada. ***c)*** Cada vellosidad contiene una red de capilares y un vaso linfático central llamado quilífero. La mayoría de los nutrimentos que se digieren entran en estos capilares, pero los lípidos entran por el quilífero. ***d)*** La membrana plasmática de las células epiteliales que cubren cada vellosidad presentan microvellosidades. PREGUNTA: ¿Qué aspecto tendría la anatomía del aparato digestivo si los pliegues, vellosidades y microvellosidades del intestino delgado no hubieran evolucionado?

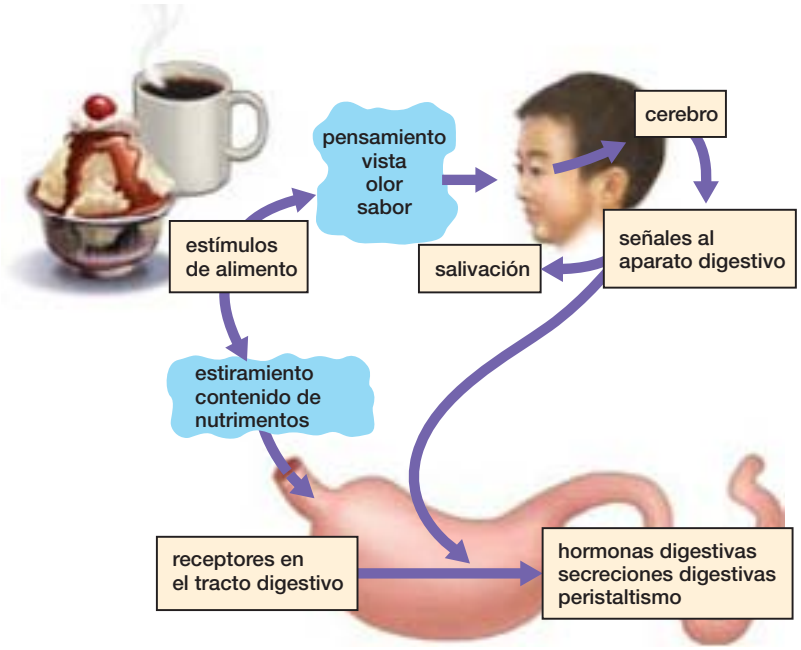


FIGURA 34-15 Nervios y hormonas influyen en el aparato digestivo

demasiado grandes para entrar en los capilares, se introducen en los vasos quilíferos, cuyas paredes son más porosas. De los vasos quilíferos son transportados dentro del sistema linfático, que finalmente los vacía en una gran vena cerca del corazón, como se describe en el capítulo 32.

En el intestino grueso se absorbe agua y se forman heces

El **intestino grueso** de un ser humano adulto mide aproximadamente 1.5 metros de largo y 7.5 centímetros de diámetro, así que es más ancho y más corto que el intestino delgado. El intestino grueso consta de dos partes: durante casi toda su extensión se le denomina **colon**, pero su compartimiento final, de unos 15 centímetros de longitud, se llama **recto**. Al intestino grueso llegan los residuos de la digestión: las paredes celulares de las verduras y frutas, pequeñas cantidades de lípidos y proteínas no digeridos, así como algunos residuos de nutrimentos, incluida agua. El intestino grueso contiene una floreciente población de bacterias (aunque, entre los mamíferos, sólo los rumiantes albergan microorganismos intestinales capaces de digerir celulosa). Estas bacterias pagan su manutención sintetizando vitamina B_{12}, tiamina, riboflavina y, de manera muy importante, vitamina K, que no suele estar presente en cantidades suficientes en la dieta, por lo que no estaría en el cuerpo si no existieran estas útiles bacterias. Las células que recubren el intestino grueso absorben estas vitaminas, así como el agua y las sales remanentes.

Una vez que termina la absorción, lo que queda es la materia semisólida que conocemos como **heces**. Éstas consisten en agua, desechos indigeribles, algunos residuos de nutrimentos, algunos productos desdoblados de los glóbulos rojos y bacterias muertas (estas últimas representan cerca de la tercera parte del peso seco de las heces). La materia fecal se transporta por movimientos peristálticos hasta el recto. La expansión de esta cámara estimula el deseo de defecar. La apertura del ano se controla mediante dos músculos esfínteres: uno interno que es involuntario y otro externo que puede controlarse de manera consciente. Aunque la defecación es un reflejo (como bien lo sabe quienquiera que tenga un bebé), se somete al control de la voluntad a partir de los dos años de edad, aproximadamente.

La digestión es controlada por el sistema nervioso y ciertas hormonas

El mesero coloca una ensalada del chef frente a nosotros que, hambrientos, comenzamos a devorarla. Sin que pensemos en ello, nuestro cuerpo coordina una serie compleja de acciones que convierten la ensalada en nutrimentos que circulan por nuestra sangre. No es sorprendente, entonces, que tanto nervios como hormonas coordinen las secreciones y actividades del tracto digestivo (FIGURA 34-15 y tabla 34-5).

Tabla 34-5 Algunas hormonas digestivas importantes

Hormona	Sitio de producción	Estímulo para la producción	Efecto
Gastrina	Estómago	Péptidos y aminoácidos en el estómago	Estimula la secreción ácida por las células estomacales
Secretina	Intestino delgado	Ácido en el intestino delgado	Estimula la producción de bicarbonato por el páncreas y el hígado; aumenta la producción hepática de bilis
Colecistocinina	Intestino delgado	Aminoácidos, ácidos grasos en el intestino delgado	Estimula la secreción de enzimas pancreáticas y la liberación de bilis de la vesícula
Péptido inhibidor gástrico	Intestino delgado	Ácidos grasos y azúcares en el intestino delgado	Inhibe los movimientos estomacales y la liberación de ácido gástrico

El alimento desencadena respuestas del sistema nervioso

El aspecto, el olor, el sabor y a veces la idea de la comida generan señales del cerebro que actúan sobre las glándulas salivales y muchas otras partes del tracto digestivo, que se preparan para digerir y absorber el alimento. Por ejemplo, estos impulsos nerviosos hacen que el estómago comience a secretar ácido y moco protector. Conforme el alimento entra al cuerpo y se mueve a través del aparato digestivo, su volumen estimula reflejos nerviosos locales que provocan movimientos peristálticos y de segmentación.

Las hormonas ayudan a regular la actividad digestiva

El aparato digestivo secreta cuatro hormonas principales, las cuales entran en el torrente sanguíneo y circulan por todo el cuerpo, actuando sobre receptores específicos del tracto digestivo. Al igual que la mayoría de las hormonas, están reguladas por retroalimentación negativa. Por ejemplo, los nutrimentos en el quimo, como aminoácidos y péptidos resultantes de la digestión de las proteínas, estimulan las células en el revestimiento del estómago para liberar la hormona **gastrina** en el torrente sanguíneo. La gastrina viaja de regreso a las células estomacales y estimula una mayor secreción de ácido, que promueve la digestión de proteínas. Cuando el pH del estómago alcanza un bajo nivel (es decir, cuando tiene elevada acidez), esto inhibe la secreción de gastrina, lo que, a la vez, inhibe una ulterior producción de ácido (FIGURA 34-16).

La gastrina también estimula la actividad muscular del estómago, lo que ayuda a desdoblar los alimentos y a enviar el quimo al intestino delgado.

Las células de la parte superior del intestino delgado liberan tres hormonas en respuesta al quimo. Juntas, ayudan a controlar tanto el ambiente químico dentro del intestino delgado como la rapidez con la que entra el quimo, promoviendo así una digestión y absorción óptimas de los nutrimentos. Las hormonas **secretina** y **colecistocinina** estimulan la liberación de fluidos digestivos en el intestino delgado: bicarbonato y enzimas digestivas del páncreas y bilis del hígado y la vesícula biliar. El **péptido inhibidor gástrico** se produce en respuesta a la presencia de ácidos grasos y azúcares en el quimo. Esta hormona estimula al páncreas a liberar en el torrente sanguíneo la hormona insulina, que ayuda a las células del cuerpo a absorber el azúcar. El péptido inhibidor gástrico (como sugiere su nombre) también inhibe tanto la producción de ácido como el peristaltismo en el estómago. Como resultado, disminuye la rapidez con la que el quimo es bombeado hacia el intestino delgado, dando tiempo adicional para que ocurra la digestión y la absorción.

FIGURA 34-16 Una retroalimentación negativa controla la acidez estomacal

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿ADELGAZAR HASTA MORIR?

tienen cinco veces más probabilidades de desarrollar ese mismo trastorno. Los problemas mentales (como ansiedad y depresión) y rasgos de personalidad (como perfeccionismo, baja autoestima y una fuerte necesidad de aceptación y logro) parecen predisponer a los individuos a los trastornos alimentarios. Muchos casos se inician durante la adolescencia, cuando los cuerpos y los cerebros de las personas experimentan rápidos cambios. Por otra parte, los anuncios en televisión, revistas e Internet bombardean a jóvenes susceptibles con el mensaje de que estar delgado es la ruta de la aceptación, la belleza y la riqueza; de esta forma, la gente intenta satisfacer estas pautas imposibles de alcanzar, lo que en ocasiones propicia una espiral fuera de control que conduce a los desórdenes alimentarios.

Por desgracia, estos trastornos son difíciles de tratar. Las víctimas por lo general reciben terapia nutricional que en ocasiones incluye hospitalización para ayudarlas a recuperarse de la desnutrición. La psicoterapia a menudo es necesaria en estos casos y, en ocasiones, también son útiles los antidepresivos. Como muchas víctimas ocultan o niegan sus problemas, y puesto que el tratamiento es caro, la mayoría de quienes padecen trastornos

FIGURA 34-17 Una víctima de anorexia de 17 años

alimentarios reciben un tratamiento inadecuado, de manera que sólo alrededor de la mitad de las víctimas de anorexia logran una plena recuperación. Para Carré Otis, la llamada de atención vino cuando, a la edad de 30 años, necesitó cirugía para aliviar su corazón dañado por años de desnutrición. Ahora recuerda: "Necesitaba cambiar o, de otra forma, mi cuerpo no lo hubiera podido soportar. En ese momento, finalmente me di cuenta qué tan fuera de control estaba y sabía que no estaba lista para morir. Estaba lista para embarcarme en el camino de la recuperación".

Piensa en esto Se ha culpado a los medios de comunicación masiva que ensalzan la delgadez de la incidencia creciente de los trastornos alimentarios. ¿Por qué crees que la extrema delgadez se ha vuelto tan atractiva? ¿Existirán medidas adecuadas que pueda tomar una sociedad libre para revertir o limitar este mensaje?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

34.1 ¿Qué nutrimentos necesitan los animales?

Cada tipo de animal tiene requerimientos nutrimentales específicos. Tales requerimientos incluyen moléculas que pueden desdoblarse para liberar energía, como lípidos, carbohidratos y proteínas; bloques químicos de construcción que sirven para formar moléculas complejas, como los aminoácidos que forman proteínas; y minerales y vitaminas que facilitan las diversas reacciones químicas del metabolismo.

Web tutorial 34.1 La digestión y absorción de alimento

34.2 ¿Cómo se efectúa la digestión?

Los sistemas digestivos deben realizar cinco tareas: ingestión, desdoblamiento mecánico de los alimentos seguido de desdoblamiento químico, absorción y eliminación de desechos. Los sistemas digestivos convierten las complejas moléculas de los cuerpos de otros animales y plantas que han sido ingeridos en moléculas más simples que pueden aprovecharse. La digestión animal en su forma más simple es intracelular, como la que se efectúa en las células individuales de una esponja. La digestión extracelular, utilizada por los animales más complejos, se efectúa en una cavidad del cuerpo. La forma más simple de sistema digestivo es una cavidad gastrovascular con forma de bolsa en organismos como la *hidra*. Otros animales más complejos utilizan un compartimiento tubular con cámaras especializadas donde el alimento se procesa en una secuencia bien definida.

34.3 ¿Cómo digieren los alimentos los seres humanos?

En el ser humano, la digestión comienza en la boca, donde el alimento se desdobla físicamente por masticación y la saliva inicia la digestión química. Luego el alimento se lleva al estómago mediante ondas peristálticas del esófago. En el entorno ácido del estómago, el alimento se bate para formar partículas más pequeñas y se inicia la digestión de proteínas. Gradualmente, el alimento licuado, que ahora se llama quimo, pasa al intestino delgado donde el bicarbonato de sodio producido por el páncreas lo neutraliza. Secreciones del páncreas, el hígado y las células del intestino delgado completan el desdoblamiento de proteínas, lípidos y carbohidratos. En el intestino delgado los productos moleculares simples de la digestión se absorben al torrente sanguíneo para distribuirse a las células del cuerpo. El intestino grueso absorbe el agua restante y convierte el material indigerible en heces, que se almacenan temporalmente en el recto y se eliminan a través del ano.

La digestión es regulada por el sistema nervioso y las hormonas. El olor y el sabor de la comida, y la masticación, estimulan la secreción de saliva en la boca y la producción de gastrina en el estómago. La gastrina estimula la producción de ácido gástrico. Al ingresar el quimo en el intestino delgado, las células intestinales producen otras tres hormonas: secretina, que estimula la producción de bicarbonato de sodio para neutralizar el quimo ácido; colecistocinina, que estimula la liberación de bilis y hace que el páncreas secrete enzimas digestivas al intestino delgado; y péptido inhibidor gástrico, que inhibe la producción de ácido y el peristaltismo del estómago. Esta inhibición hace más lenta la transferencia de alimento al intestino.

TÉRMINOS CLAVE

absorción *pág. 700*
ácido graso esencial *pág. 686*
amilasa *pág. 695*
aminoácido esencial *pág. 688*
bilis *pág. 698*
boca *pág. 692*
caloría *pág. 686*
Caloría *pág. 686*
carnívoro *pág. 693*
cavidad gastrovascular *pág. 693*
celulasa *pág. 694*
colecistocinina *pág. 702*
colon *pág. 701*
digestión *pág. 692*
digestión extracelular *pág. 693*
digestión intracelular *pág. 693*
epiglotis *pág. 697*
estómago *pág. 697*
faringe *pág. 697*
gastrina *pág. 702*
glucógeno *pág. 688*
heces *pág. 701*
herbívoro *pág. 693*
hígado *pág. 698*
índice de masa corporal *pág. 687*
intestino delgado *pág. 698*
intestino grueso *pág. 701*
intolerancia a la lactosa *pág. 700*
jugo pancreático *pág. 699*
lipasa *pág. 698*
lisosoma *pág. 693*
microvellosidad *pág. 700*
mineral *pág. 688*
movimiento de segmentación *pág. 700*
nutrimento *pág. 686*
omnívoro *pág. 693*
páncreas *pág. 699*
péptido inhibidor gástrico *pág. 702*
peristaltismo *pág. 697*
proteasa *pág. 698*
quilífero *pág. 700*
quimo *pág. 698*
recto *pág. 701*
rumiante *pág. 694*
sales biliares *pág. 698*
secretina *pág. 702*
sistema digestivo *pág. 692*
urea *pág. 698*
vacuola alimentaria *pág. 693*
vellosidades *pág. 700*
vesícula biliar *pág. 698*
vitamina *pág. 688*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

Cita cuatro tipos generales de nutrimentos y describe el papel de cada uno en la nutrición.

Describe dos tipos diferentes de especializaciones del tracto digestivo, incluida su función y su relación con la dieta del animal.

Menciona y describe las funciones de las tres principales secreciones del estómago.

¿Por qué el estómago es muscular y expansible?

Menciona las sustancias que se secretan al intestino delgado y describe el origen y la función de cada una.

6. Nombra y describe los movimientos musculares que impulsan el alimento a través del tracto digestivo humano.
7. La vitamina C es una vitamina en el ser humano, pero no en el perro. Ciertos aminoácidos son indispensables para el ser humano, pero no para las plantas. Explica esto.
8. Menciona cuatro adaptaciones estructurales o funcionales del intestino delgado humano que aseguran una buena digestión y absorción.
9. Describe la digestión de proteínas en el estómago y el intestino delgado.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

La etiqueta de una lata de sopa indica que el producto contiene 10 gramos de proteínas, 4 gramos de carbohidratos y 3 gramos de grasas. ¿Cuántas Calorías contiene esta sopa?

Las aves pequeñas tienen altas tasas metabólicas, tractos digestivos eficientes y dietas altas en calorías. Algunas aves consumen alimento equivalente al 34 por ciento de su peso corporal cada día. ¿Por qué crees que casi nunca comen hojas o pasto?

El control del tracto digestivo humano implica varios circuitos de retroalimentación y mensajes que coordinan las actividades en una cámara con las que se están efectuando en cámaras subsiguientes. Menciona en orden las acciones de coordinación analizadas en este capítulo, desde la degustación, masticación y deglución de un trozo de carne hasta que el residuo ingresa en el intestino grueso. ¿Qué activa y desactiva cada proceso?

4. Protozoarios simbióticos en el tracto digestivo de las termitas producen celulasa que usan sus huéspedes. A cambio, las termitas brindan alimento y abrigo a los protozoarios. Imagina que la especie humana es invadida gradualmente, a lo largo de muchas generaciones, por protozoarios simbióticos capaces de producir celulasa. ¿Qué cambios evolutivos podrían presentarse simultáneamente en la estructura y la función del cuerpo para adaptarse a esto?

5. Sigue la trayectoria de un emparedado de jamón y queso con lechuga a través del aparato digestivo humano, explicando qué sucede a cada parte del emparedado al pasar por cada región del tracto digestivo.
6. Uno de los remedios comunes para el estreñimiento (dificultad para defecar) es una solución laxante que contiene sales de magnesio. En el intestino grueso, la pared intestinal absorbe muy lentamente las sales de magnesio, por lo que éstas permanecen en el tracto intestinal durante mucho tiempo. Así, las sales afectan el movimiento del agua en el intestino grueso. Con base en esta información, explica la acción laxante de las sales de magnesio.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Blaser, M. J. "An Endangered Species in the Stomach". *Scientific American*, febrero de 2005. Describe los beneficios y problemas asociados con la presencia de la bacteria causante de la úlcera (*Helicobacter pylori*) en el estómago.

Pennisi, E. "The Dynamic Gut". *Science*, 25 de marzo de 2005. Los sistemas digestivos de algunos vertebrados cambian para adaptarse a diferentes regímenes de alimentación.

Pennisi, E. "A Mouth Full of Microbes". *Science*, 25 de marzo de 2005. Los investigadores están aprendiendo más acerca de la comunidad bacterial en la boca humana.

Pollen, M. "Power Steer". *New York Times Magazine*, 31 de marzo de 2002. Una excelente descripción de cómo la industria ganadera ha provocado graves problemas (incluido el desarrollo de bacterias resistentes a los antibióticos) al ignorar el tracto digestivo especializado de los rumiantes.

Raloff, J. "Still Hungry?" *Science News*, 2 de abril de 2005. La investigación arroja luz sobre las "hormonas del apetito".

Raloff. J. "Vitamin Boost". *Science News*, 9 de octubre de 2004. Se descubren nuevos beneficios de la vitamina D y algunos peligros de su deficiencia.

Trivedi, B. "Slimming for Slackers". *New Scientist*, 1 de octubre de 2005. El tipo de bacterias que viven en nuestro intestino podría determinar cuántas calorías extraemos de los alimentos.

Vogel, S. "Why We Get Fat". *Discover*, abril de 1999. Los estadounidenses están engordando por diversas razones: ambientales, genéticas y conductuales.

CAPÍTULO 35

El sistema urinario

Los cirujanos preparan un riñón donado para trasplante.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Compatibilidad perfecta

35.1 ¿Cuáles son las funciones básicas de los sistemas urinarios?

35.2 ¿Cuáles son algunos ejemplos de sistemas excretores de invertebrados?

Los protonefridios filtran el líquido intersticial en los platelmintos

Los túbulos de Malpighi filtran la sangre de los insectos

Los nefridios de la lombriz de tierra filtran el líquido celómico

35.3 ¿Qué funciones tienen los sistemas urinarios de los vertebrados?

Los riñones de los vertebrados filtran la sangre

La excreción de los desechos nitrogenados está adaptada al ambiente

35.4 ¿Cuáles son las estructuras y funciones del aparato urinario humano?

El aparato urinario consta de riñones, uréteres, vejiga y uretra

La orina se forma en las nefronas de los riñones

De cerca: Las nefronas y la formación de orina

El filtrado se convierte en orina en el túbulo de las nefronas

Guardián de la salud: Cuando los riñones fallan

El asa de Henle permite la concentración de la orina

35.5 ¿Cómo ayudan los riñones de los mamíferos a conservar la homeostasis?

Los riñones regulan el contenido de agua de la sangre

Los riñones liberan hormonas que ayudan a regular la presión arterial y los niveles de oxígeno de la sangre

Los riñones vigilan y regulan las sustancias disueltas en la sangre

Los riñones de los vertebrados están adaptados a diversos entornos

Enlaces con la vida: ¿Demasiado líquido para beber?

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Compatibilidad perfecta

ESTUDIO DE CASO COMPATIBILIDAD PERFECTA

KAY BURT ES UNA SOBREVIVIENTE. Su historia comenzó en 1966, cuando apenas se iniciaban los trasplantes de riñones, y ahora comprende tres generaciones de su familia. Kay nació con riñones muy pequeños y estuvo al borde de la muerte cuando tenía 14 años. Las arcaicas máquinas de diálisis de ese tiempo no podían mantenerla viva; Kay llegó a pesar 26 kilos. Cuando su médico sugirió un procedimiento radical, el trasplante renal, su padre, quien era un donador compatible para Kay, sin dudarlo ofreció uno de sus riñones. Para entonces, el trasplante renal estaba en sus etapas iniciales de desarrollo; el trasplante de Kay era apenas el quinto caso en todo el estado de Texas. El trasplante se practicó en una agotadora cirugía de 12 horas. Cuando el riñón trasplantado comenzó a funcionar normalmente en el cuerpo de Kay, parecía un milagro. El médico de Kay le advirtió que nunca debía embarazarse, pues temía que el bebé en desarrollo pudiera dañar el órgano trasplantado o sus delicadas conexiones. A pesar de esta advertencia, cinco años más tarde Kay dio a luz a una hija saludable, Cherry. Después de tres décadas de buena salud, la vida de Kay se vio amenazada de nuevo en 1998. Sólo dos semanas después del fallecimiento de su amado padre, su riñón, que había funcionado en su cuerpo durante 32 años, también falló, lo que obligó a Kay a volver a depender de la diálisis.

Cada año en Estados Unidos, decenas de miles de personas pierden sus funciones renales. Alrededor de 16,000 recibirán un trasplante renal, unos 67,000 pacientes están en espera de un riñón para trasplante y unos 3500 mueren cada año mientras esperan un trasplante. Más de 300,000 personas que han perdido las funciones renales se mantienen vivas gracias a la hemodiálisis (a menudo conocida simplemente como "diálisis"). ¿Qué es la hemodiálisis y cómo funciona? ¿Qué otros "milagros médicos" podrían ayudar a la gente con problemas en el aparato urinario en el futuro? ¿Cómo enfrentaron Kay y su familia la recaída?

35.1 ¿CUÁLES SON LAS FUNCIONES BÁSICAS DE LOS SISTEMAS URINARIOS?

En este capítulo exploraremos el funcionamiento de los sistemas urinarios y descubriremos que hacen mucho más que simplemente producir *orina*. Los **sistemas urinarios** desempeñan muchas funciones cruciales relacionadas con la **homeostasis** (véase el capítulo 31), ayudando así a mantener la composición química de la sangre y el líquido extracelular dentro de los estrechos límites requeridos para el metabolismo celular. Un elemento esencial de la homeostasis es el equilibrio del agua, que resulta crucial para mantener la adecuada concentración u **osmolaridad** de los solutos (sustancias disueltas) en las células y en su ambiente extracelular. En el cuerpo las sustancias disueltas incluyen iones como el sodio (Na^+), cloro (Cl^-) y calcio (Ca^{++}), así como urea, azúcares, aminoácidos y proteínas, por nombrar sólo algunas. Las soluciones con osmolaridad más alta tienen más partículas disueltas que aquellas con menor osmolaridad.

Al igual que en muchos sistemas fisiológicos, el sistema urinario es un ejemplo de maestría en el desempeño de múltiples tareas. Una importante función del sistema urinario es la **excreción**, un término general que se refiere a la eliminación por parte del cuerpo de desechos o sustancias en exceso. La excreción también se realiza a través del aparato respiratorio (para el caso del dióxido de carbono) y del aparato digestivo (en el caso del material no digerido). El sistema urinario elimina muchos productos de desecho del metabolismo celular, por ejemplo, la urea producida por el desdoblamiento de aminoácidos, así como exceso de agua, exceso de ciertas vitaminas y algunos medicamentos.

Ya sea que hablemos de platelmintos, peces o seres humanos, los sistemas urinarios (conocidos también como *sistemas excretores*) desempeñan funciones similares de acuerdo con la misma secuencia básica de procesos:

Se filtra la sangre o el líquido intersticial, eliminando el agua y pequeñas moléculas disueltas.

2. Los nutrimentos se reabsorben de manera selectiva a partir del filtrado.
3. El exceso de agua, el exceso de nutrimentos y los desechos disueltos se excretan del cuerpo.

Es importante reconocer que los sistemas urinarios deben estar en estrecha asociación con el **líquido intersticial**, la sustancia acuosa que baña todas las células, para poder eliminar los desechos. En los animales más simples, este líquido es filtrado directamente por el sistema excretor. En animales con un sistema circulatorio, el sistema excretor filtra la sangre conforme ésta pasa por el sistema circulatorio, como se explica en los siguientes ejemplos.

35.2 ¿CUÁLES SON ALGUNOS EJEMPLOS DE SISTEMAS EXCRETORES DE INVERTEBRADOS?

Los protonefridios filtran el líquido intersticial en los platelmintos

Lo más probable es que las primeras estructuras de excreción especializadas que surgieron en el curso de la evolución animal hayan sido los **protonefridios** (que literalmente significa "antes del nefridio"), los cuales consisten en tubos que transportan líquido y desechos del poro excretor que se vacía hacia el exterior. Células huecas que contienen cilios batientes (llamados *células flamígeras*, porque son cilios que, al moverse, semejan una llama parpadeante) producen una corriente que extrae agua y desechos disueltos hacia los túbulos y los dirige hacia el exterior a través de poros excretores. Los platelmintos de agua dulce, los cuales poseen un sistema protonefridial, deben excretar grandes cantidades de agua que entra en sus cuerpos por ósmosis. Los platelmintos carecen de sistemas circulatorios, y sus dos protonefridios se ramifican por todo el cuerpo, donde recolectan el exceso de agua y algunos desechos que se llevan al exterior a través de numero-

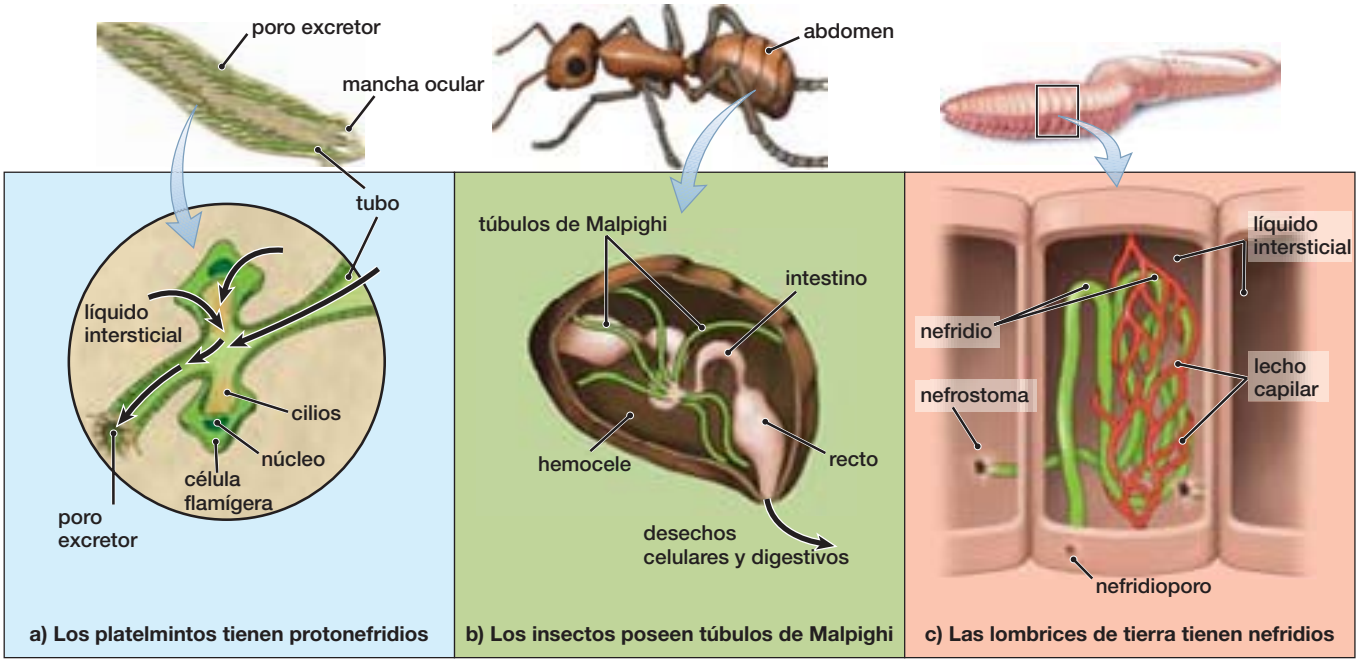


FIGURA 35-1 Sistemas excretores de algunos invertebrados

sos poros excretores (FIGURA 35-1a). Los platelmintos también tienen una gran superficie corporal a través de la cual sale por difusión la mayor parte de los desechos celulares.

Los túbulos de Malpighi filtran la sangre de los insectos

Los insectos tienen un sistema circulatorio abierto, en el cual la sangre llena una cavidad corporal (el *hemocele*) y baña los tejidos directamente. Los sistemas excretores de los insectos consisten en **túbulos de Malpighi**, que son pequeños conductos que se extienden hacia fuera desde el intestino y desembocan dentro de la sangre del hemocele. Los desechos y las sales se mueven por difusión y transporte activo desde la sangre que hay alrededor hacia los túbulos, y el agua les sigue por ósmosis (FIGURA 35-1b). En el intestino y el recto, se secretan importantes sales de regreso hacia la sangre por transporte activo, y el agua les sigue por ósmosis. Los insectos pueden producir orina muy concentrada, que se excreta junto con las heces.

Los nefridios de la lombriz de tierra filtran el líquido celómico

Las lombrices de tierra, los moluscos y otros invertebrados tienen sencillas estructuras llamadas **nefridios**. En la lombriz de tierra la cavidad corporal que rodea a los órganos internos (el celoma) está llena de líquido. Este líquido celómico recolecta tanto desechos como nutrimentos de la sangre y los tejidos. El líquido se introduce por una abertura con forma de embudo llamado **nefrostoma** y es impulsado por cilios a lo largo de un angosto y tortuoso tubo rodeado de capilares (FIGURA 35-1c). Ahí, las sales y otros nutrimentos disueltos se reabsorben a la sangre por los capilares, dejando atrás agua y desechos. La orina así producida se almacena en una porción ensanchada del **nefridioporo**, una abertura en la pared corporal. Cada uno de los segmentos que componen a la lombriz de tierra posee un par de nefridios. Conforme estudies los túbulos renales de los vertebrados, observa la semejanza que tienen con los nefridios.

35.3 ¿QUÉ FUNCIONES TIENEN LOS SISTEMAS URINARIOS DE LOS VERTEBRADOS?

Los sistemas excretores de los vertebrados deben filtrar los desechos y extraerlos de la sangre mientras retienen los nutrimentos y el nivel adecuado de agua.

Los riñones de los vertebrados filtran la sangre

Los **riñones** filtran la sangre para extraer el agua y todas las moléculas disueltas en ella (excluyendo las proteínas). Luego, los riñones reabsorben agua y nutrimentos importantes para reincorporarlos a la sangre, dejando atrás las sustancias tóxicas, los productos celulares de desecho, así como las vitaminas, sales, hormonas y agua. Algunos desechos adicionales son transportados activamente hacia el líquido remanente, que se convierte en **orina**. El resto del sistema urinario dirige y almacena la orina hasta que se expulsa del cuerpo. El sistema urinario de los mamíferos ayuda a mantener la homeostasis de varias maneras, a saber:

- Regula los niveles sanguíneos de iones como sodio, potasio, cloruro y calcio
- Regula el contenido de agua de la sangre
- Mantiene el pH correcto de la sangre
- Retiene nutrimentos importantes como glucosa y aminoácidos en la sangre

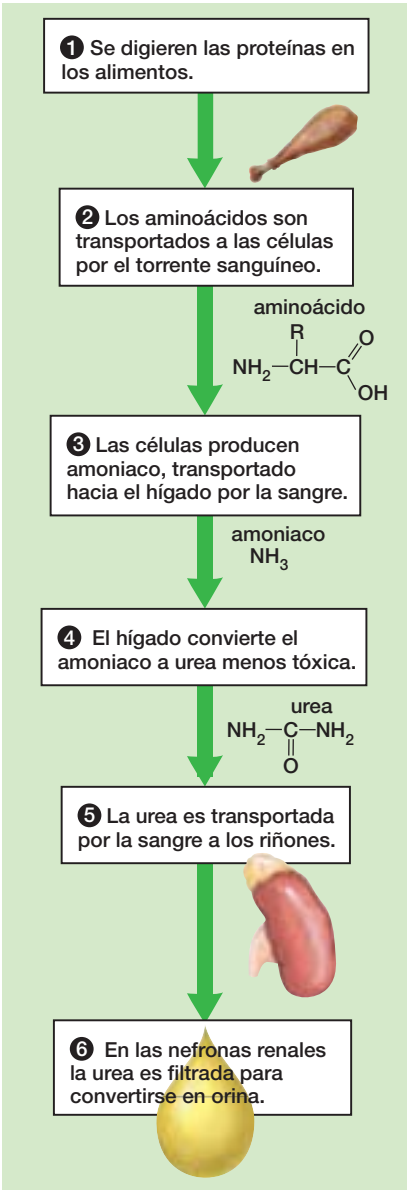

1 Se digieren las proteínas en los alimentos.
2 Los aminoácidos son transportados a las células por el torrente sanguíneo.
aminoácido
3 Las células producen amoniaco, transportado hacia el hígado por la sangre.
amoniaco
NH3
4 El hígado convierte el amoniaco a urea menos tóxica.
urea
5 La urea es transportada por la sangre a los riñones.
6 En las nefronas renales la urea es filtrada para convertirse en orina.

FIGURA 35-2 La formación y excreción de urea
PREGUNTA: En algunos animales el amoniaco no se convierte en urea, pero es transportado por la sangre hasta que se excreta. ¿En qué tipos de ambientes esperarías encontrar esos animales?

- Secreta hormonas como la *eritropoyetina*, que estimula la producción de glóbulos rojos
- Elimina productos celulares de desecho, como la *urea*

La excreción de los desechos nitrogenados está adaptada al ambiente

Una función importante de los sistemas excretores es eliminar desechos celulares que son el resultado de la digestión de las proteínas. Tales desechos se denominan *desechos nitrogenados* porque contienen nitrógeno derivado de los aminoácidos de las proteínas. Los animales excretan desechos nitrogenados como *amoniaco*, *urea* o *ácido úrico*.

Cuando los aminoácidos entran en las células, algunos se utilizan directamente para sintetizar nuevas proteínas. A otros se les quita el grupo amino ($-NH_2$) y se les usa como fuente de energía o para sintetizar nuevas moléculas. Los grupos amino se liberan en forma de **amoniaco** (NH_3), que es

muy tóxico. Los peces excretan amoniaco, que pasa por difusión fácilmente de los capilares en sus branquias al agua que hay alrededor (véase la figura 35-8a). En los vertebrados terrestres, el amoniaco se transporta en la sangre al hígado, donde las reacciones que requieren energía lo convierten en **urea**, que es una sustancia mucho menos tóxica (**FIGURA 35-2**). Los riñones filtran la urea de la sangre y la excretan en la orina.

Puesto que la urea es soluble en agua, es preciso excretar algo de agua junto con la urea, aunque la pérdida de agua resulte desventajosa. Las aves y los reptiles evitan este problema: excretan los desechos nitrogenados en forma de **ácido úrico**, una molécula más compleja. El ácido úrico no es muy soluble; las aves, los reptiles y los insectos lo excretan como una pasta junto con las heces, de manera que hay muy poca pérdida de agua.

35.4 ¿CUÁLES SON LAS ESTRUCTURAS Y FUNCIONES DEL APARATO URINARIO HUMANO?

El aparato urinario consta de riñones, uréteres, vejiga y uretra

Los riñones humanos son un par de órganos situados uno a cada lado de la columna vertebral y que se extienden un poco por arriba de la cintura (**FIGURA 35-3**). Cada uno mide aproximadamente 13 centímetros de altura, 8 centímetros de ancho y 2.5 centímetros de espesor. Los riñones tienen la forma y el color de un frijol. La sangre con desechos celulares disueltos entra en cada riñón por una **arteria renal**. Una vez que la sangre se ha filtrado, sale por la **vena renal** (**FIGURAS 35-3** y **35-4**). La orina sale de cada riñón por un estrecho tubo muscular llamado **uréter**. Mediante contracciones peristálticas, los uréteres transportan orina a la *vejiga urinaria*, o simplemente **vejiga**. Esta cámara muscular hueca recolecta y acumula la orina.

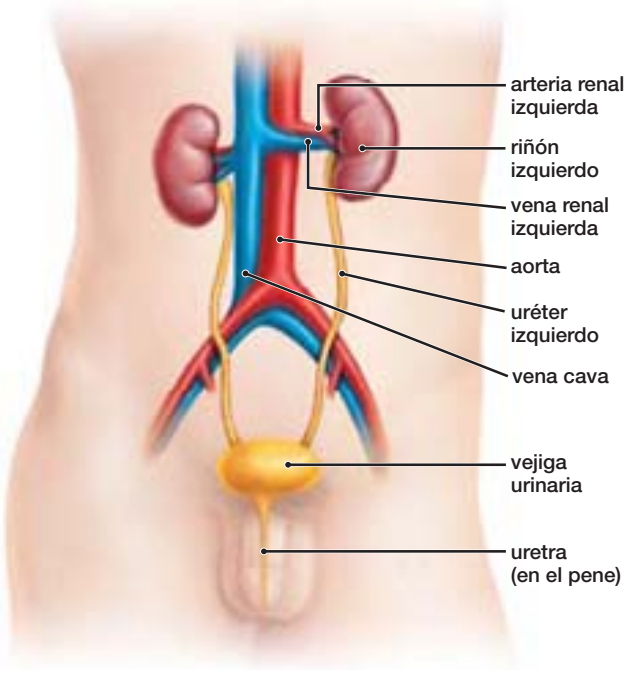


FIGURA 35-3 El aparato urinario humano
Diagrama simplificado del aparato urinario humano y su abasto de sangre.

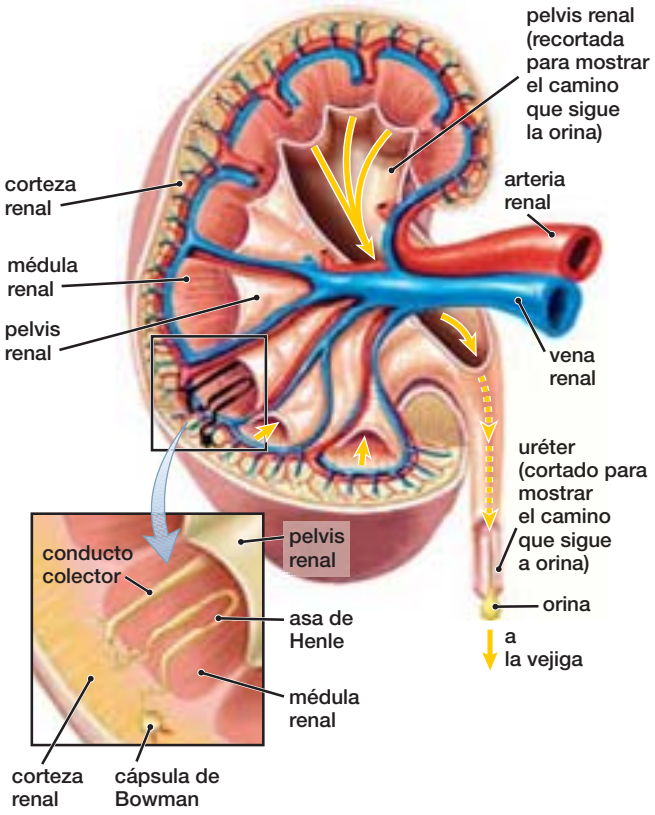


FIGURA 35-4 Sección transversal de un riñón
Se ha dibujado una nefrona, muy amplificada (y todavía más amplificada en el recuadro), para mostrar su ubicación en el riñón. Los conductos colectores vierten la orina en los canales que conducen a la pelvis renal, una cámara que vierte la orina en el uréter y hacia fuera del riñón.

Las paredes de la vejiga, que contienen músculos lisos, pueden expandirse considerablemente. La orina se retiene en la vejiga gracias a dos esfínteres situados justo arriba de la abertura a través de la cual vierte su contenido a la uretra. Cuando la vejiga se distiende por la orina almacenada, receptores situados en sus paredes detectan esta condición e inician contracciones reflejas. El esfínter más cercano a la vejiga, el *esfínter interno,* se abre como parte de este reflejo, pero el *esfínter externo* o inferior se controla voluntariamente, así que el cerebro puede suprimir el reflejo, a menos que la distensión de la vejiga sea extrema. La vejiga de un adulto puede contener, en promedio, 500 mililitros de orina, pero el deseo de orinar se activa con acumulaciones mucho menores. La orina termina su viaje al exterior a través de la **uretra**, un único tubo angosto con una longitud aproximada de unos 4 centímetros en la mujer y unos 20 centímetros en el hombre (ya que se extiende a lo largo del pene).

La orina se forma en las nefronas de los riñones

Cada riñón contiene una capa exterior sólida que consiste en la **corteza renal**, la cual cubre la **médula renal**. En esta capa exterior se forma la orina. Debajo de la corteza y la médula se encuentra la **pelvis renal**, una cámara interior subdividida que recolecta la orina y la dirige hacia el uréter (véase la figura 35-4). Un examen microscópico de la capa exterior del riñón revela una serie de diminutos filtros individuales llamados **nefronas**, con una extensa red de vasos sanguíneos. La capa exterior de cada riñón contiene más de un millón de nefronas.

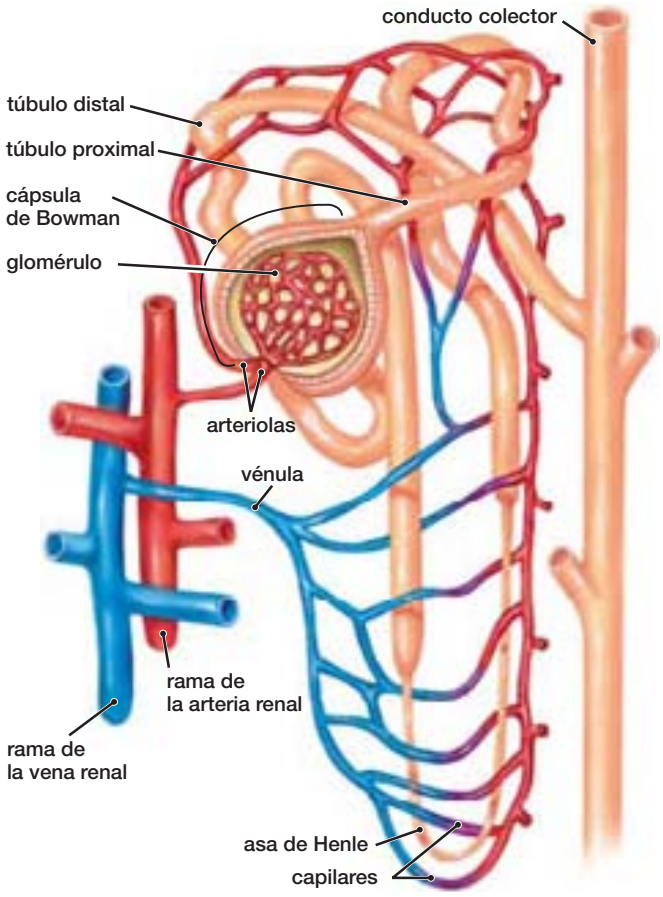
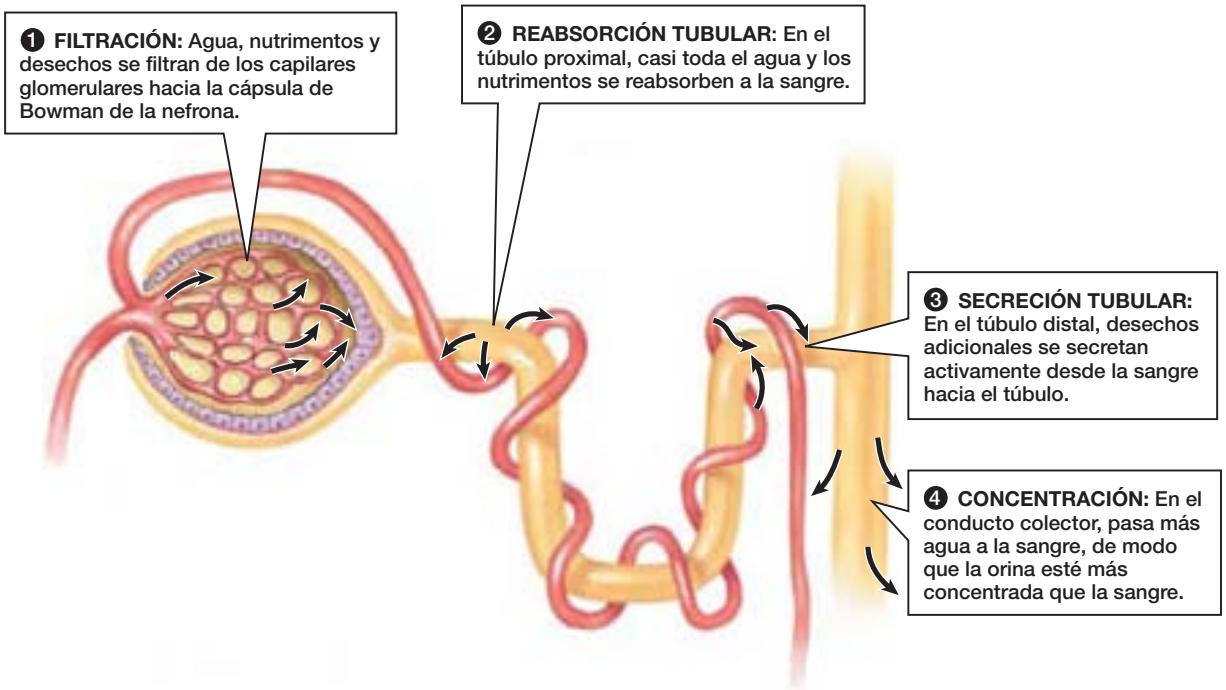


FIGURA 35-5 **Una nefrona y su abasto de sangre**

Cada nefrona consta de tres partes principales: el **glomérulo**, una densa masa de capilares de los cuales se toma líquido de la sangre a través de las paredes capilares porosas; la **cápsula de Bowman**, una estructura con forma de copa que rodea el glomérulo; y un **túbulo** ("tubo pequeño", en latín) largo y tortuoso. El túbulo se subdivide en tres partes: el *túbulo proximal*, el *asa de Henle* y el *túbulo distal*. Los **conductos colectores** son tubos más grandes que recolectan el líquido de muchas nefronas y lo conducen de la corteza a la médula y a la pelvis renal (**FIGURAS 35-5** y **35-6**). Los procesos mediante los cuales estas estructuras producen orina y ayudan a conservar la homeostasis se resumen en los siguientes apartados y se describen con más detalle en la sección "De cerca: Las nefronas y la formación de orina".

La sangre se filtra a través de los capilares al glomérulo

Casi una cuarta parte del volumen de sangre bombeada por cada latido cardiaco viaja a través de los riñones, que reciben más de un litro de sangre cada minuto. Cada nefrona recibe sangre de una arteriola que se ramifica desde la arteria renal. Dentro de la cápsula de Bowman la arteriola se divide en numerosos capilares microscópicos que se entretejen en una masa llamada glomérulo (véase la figura 35-6). Las paredes de los capilares del glomérulo son sumamente permeables al agua y a las pequeñas moléculas disueltas, pero no dejan pasar a los glóbulos rojos, las gotitas de grasa ni tampoco a la mayor parte de las proteínas grandes, como la albúmina. Más allá del glomérulo, los capilares se juntan para formar una arteriola más delgada que la arteriola que entró (esto difiere de la situación habitual, en la que la sangre fluye de los capilares a las vénulas). Esta diferencia de diámetro entre la arteriola que entra y la que sale crea presión dentro del glomérulo, lo que permite la expulsión de agua y muchas sustancias disueltas en la sangre, a través de las paredes porosas de los


❶ FILTRACIÓN: Agua, nutrimentos y desechos se filtran de los capilares glomerulares hacia la cápsula de Bowman de la nefrona.
❷ REABSORCIÓN TUBULAR: En el túbulo proximal, casi toda el agua y los nutrimentos se reabsorben a la sangre.
❸ SECRECIÓN TUBULAR: En el túbulo distal, desechos adicionales se secretan activamente desde la sangre hacia el túbulo.
❹ CONCENTRACIÓN: En el conducto colector, pasa más agua a la sangre, de modo que la orina esté más concentrada que la sangre.

DE CERCA Las nefronas y la formación de orina

La compleja estructura de la nefrona está perfectamente adaptada a su función. En la **FIGURA E35-1** se presenta un diagrama de una nefrona, con el fin de ilustrar los procesos que se efectúan en cada parte. Los números encerrados en círculos en la ilustración corresponden a las siguientes descripciones:

① *Filtración*. Agua y sustancias disueltas son expulsadas de los capilares glomerulares hacia la cápsula de Bowman y se introducen en el túbulo proximal.

② *Reabsorción tubular*. En el túbulo proximal, casi todos los nutrimentos importantes que permanecen en el filtrado se bombean activamente hacia fuera a través de las paredes del túbulo y la sangre los reabsorbe. Estos nutrimentos incluyen sales, aminoácidos, azúcares y vitaminas. El túbulo proximal es muy permeable al agua, así que ésta sigue a los nutrimentos y pasa por ósmosis del túbulo a la sangre.

③ El asa de Henle, presente únicamente en las aves y los mamíferos, es indispensable para concentrar la orina. Mantiene un gradiente de concentración de sales en el líquido extracelular que la rodea, con la concentración más alta en la parte inferior del asa. La porción descendente del asa de Henle es muy permeable al agua, pero no a la sal ni a otras sustancias disueltas. Al pasar el filtrado por la porción descendente, el agua sale por ósmosis a medida que aumenta la concentración del líquido circundante.

④ La porción delgada del asa de Henle ascendente es relativamente impermeable al agua y la urea, pero es permeable a la sal, la cual sale del filtrado por difusión. ¿Por qué? Aunque las concentraciones osmóticas dentro y fuera del túbulo son casi iguales, en esta porción del asa el nivel de urea es más alto afuera, en tanto que el nivel de sal es más alto adentro. Por ello, el gradiente de concentración favorece la difusión de la sal hacia fuera. Como el agua no puede seguirla, ahora el filtrado está menos concentrado que su entorno.

⑤ La porción gruesa del asa de Henle ascendente también es impermeable al agua y la urea. Ahí, se extrae activamente sal del filtrado, en el cual se quedan agua y desechos.

⑥ El filtrado acuoso, bajo en sal pero que conserva desechos como la urea, llega a la porción distal del túbulo con osmolaridad más baja (es decir, más diluido) que cuando entró en el asa. Ahora se extrae más sal por bombeo y como esta porción es permeable al agua, ésta sigue a la sal por ósmosis. La secreción tubular es especialmente activa en el túbulo distal, donde sustancias como K^+, H^+, NH_3, así como algunos fármacos y toxinas se bombean activamente hacia el túbulo desde el líquido extracelular.

⑦ Para cuando el filtrado llega al conducto colector, queda muy poca sal y cerca del 99 por ciento del agua ha sido reabsorbida al torrente sanguíneo. Puesto que ha perdido tanto sal como agua, el líquido ahora tiene aproximadamente la misma osmolaridad que cuando entró en el asa de Henle. El conducto colector lleva la orina a través del creciente gradiente de concentración en el líquido extracelular creado por el asa de Henle. El conducto colector es muy permeable al agua cuando está presente la hormona antidiurética (ADH), así que el agua sale por ósmosis al aumentar la concentración del líquido externo. Si no hay ADH presente, el conducto colector es impermeable al agua y la orina conserva un alto contenido de agua.

⑧ La porción inferior del conducto recolector también es permeable a la urea. Por ello, a medida que el filtrado baja por el conducto, algo de urea sale por difusión y contribuye a incrementar la osmolaridad del líquido circundante. Cuando está presente la ADH, el agua también sale. En el caso más extremo, la osmolaridad de la orina en el conducto colector puede alcanzar el equilibrio con la alta osmolaridad del líquido externo; en los seres humanos, esto significa cuatro veces la osmolaridad de la sangre.

capilares. Este proceso se denomina **filtración** y el líquido resultante se llama **filtrado** (véase la figura 35-6, paso ① y figura E35-1, paso ①

(como el que recibió Kay Burt de manera tan afortunada). Si la filtración se ve afectada, el volumen de sangre se incrementa (lo que provoca presión arterial elevada), el equilibrio de las sales y del pH se altera, y los desechos tóxicos se retienen en la sangre.

El filtrado se convierte en orina en el túbulo de las nefronas

El filtrado que se recolecta en la cápsula de Bowman contiene una mezcla de desechos y nutrimentos esenciales, además de grandes cantidades de agua. El túbulo de la nefrona debe devolver los nutrimentos y casi toda el agua a la sangre, pero conservar los desechos y el exceso de agua para eliminarlos; de esta forma, el equilibrio del agua y los nutrimentos que se requiere para la homeostasis se conserva. Esto se logra mediante dos procesos: la *reabsorción tubular* y la *secreción tubular*.

La **reabsorción tubular**

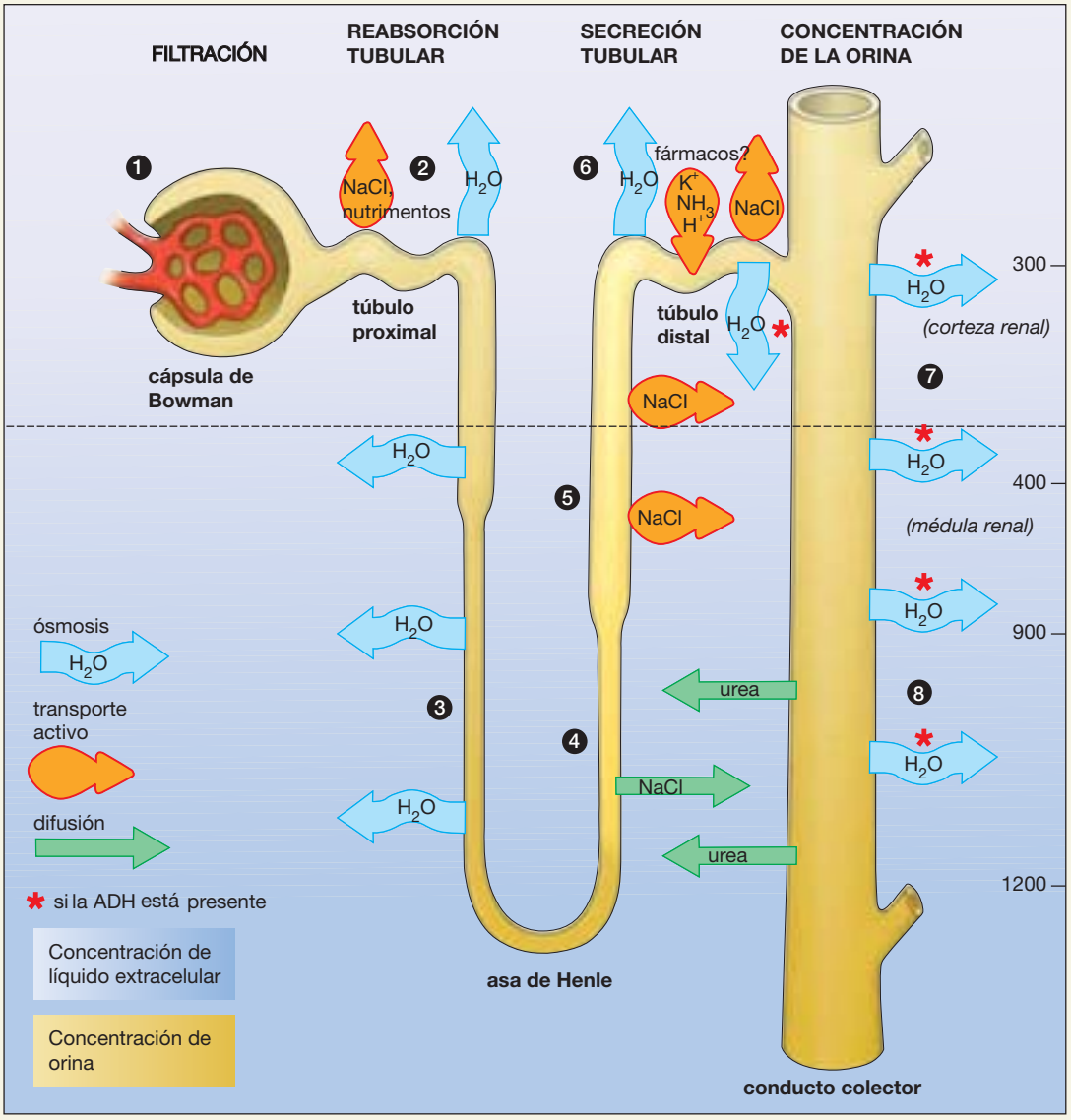


FIGURA E35-1 Detalles de la formación de orina
Una nefrona individual en la que se indica el movimiento de materiales a través de las distintas regiones. La concentración de sustancias disueltas en el filtrado dentro de la nefrona aumenta de arriba abajo en este diagrama. Fuera de la nefrona, tonos más oscuros de azul representan concentraciones más altas de sales y urea en el líquido circundante. La línea punteada marca la frontera entre la corteza renal y la médula renal.

sales, aminoácidos y glucosa) a partir del filtrado, sacarlos del túbulo y conducirlos al fluido intersticial. De aquí, los nutrimentos entran en los capilares adyacentes por difusión. El agua sigue pasivamente, por ósmosis, a los nutrimentos que salen del túbulo hacia los capilares (véase la figura 35-6, paso ② y figura E35-1, paso ②). Conforme pasa por todo el largo del túbulo, aproximadamente el 99 por ciento del agua se reabsorbe.

La **secreción tubular** transporte activo para secretar desechos y sustancias en exceso hacia el túbulo distal (véase la figura 35-6, paso ③, y figura E35-1, paso ⑥

GUARDIÁN DE LA SALUD Cuando los riñones fallan

Si los riñones fallan, la muerte es rápida, por lo regular en menos de dos semanas. Cada año, cerca de 90,000 estadounidenses mueren como resultado de enfermedades del aparato urinario. Las causas más comunes de la insuficiencia renal son la diabetes y la hipertensión, que dañan los capilares glomerulares; pero los riñones también son vulnerables a las infecciones y las sobredosis de algunos analgésicos. La insuficiencia renal por lo regular se trata con hemodiálisis.

Esta técnica, que se usó por primera vez en 1945, opera con base en el sencillo principio de que las sustancias se difunden de áreas de más alta concentración hacia áreas de menor concentración a través de membranas artificiales permeables. Este proceso recibe el nombre de *diálisis*. Cuando la sangre se filtra empleando este principio, el proceso se denomina **hemodiálisis.** Durante la hemodiálisis, la sangre del paciente se extrae del cuerpo y se bombea a través de tubos delgados hechos de una membrana especial de celofán y suspendidos en líquido dializante. Al igual que los capilares glomerulares, la membrana tiene poros demasiado pequeños para permitir el paso de los glóbulos y las proteínas grandes de la sangre, pero que dejan pasar moléculas pequeñas como agua, azúcar, sales, aminoácidos y urea. El líquido dializante tiene los niveles normales sanguíneos de sales y nutrimentos, sin incluir productos de desecho; de esta forma, sólo las moléculas cuya concentración sea más alta de lo normal en la sangre del paciente (como la urea, un producto de desecho) se difunden hacia el líquido dializante, que se repone continuamente para conservar su gradiente. El paciente debe permanecer conectado a la máquina de diálisis de 4 a 6 horas, tres veces por semana (**FIGURA E35-2**). La gente que depende de la diálisis puede sobrevivir muchos años, siempre y cuando su dieta y la ingesta de líquidos estén bajo estricta supervisión. Aun con diálisis, la composición de la sangre de los pacientes fluctúa y las sustancias tóxicas alcanzan niveles más altos de lo normal, entre una sesión y otra.

La *diálisis peritoneal* es una técnica menos común en la que líquido dializante se bombea a través de un tubo implantado directamente en la cavidad abdominal. Esta cavidad está revestida por una membrana natural llamada *peritoneo*. Los productos de desecho de la sangre que circula por los capilares del peritoneo se difunden gradualmente hacia el líquido de diálisis, que luego se drena por el tubo. El paciente puede efectuar este procedimiento en casa, cambiando el líquido de diálisis unas cuatro veces al día, o conectando su tubo implantado a una máquina que hace circular el líquido por la cavidad abdominal durante la noche.

¿Qué posibilidades ofrecerá el futuro para las víctimas de enfermedades renales? En la Universidad de Michigan, el doctor David Humes desarrolló un prototipo de "riñón bioartificial". El dispositivo de Humes hace circular la sangre a través de un cartucho lleno con pequeños tubos revestidos con células vivas del túbulo proximal del riñón, que se cultivan a partir de las células extraídas de los riñones humanos donados. Pruebas clínicas con este dispositivo en pacientes de cuidado intensivo cuyos riñones fallaban demostraron que el riñón bioartificial, utilizado en conjunción con una máquina de hemodiálisis, mejoraba la función renal en pacientes cercanos a la muerte por problemas del aparato urinario. Humes espera usar en el futuro esta tecnología en un riñón bioartificial implantado. Los investigadores también continúan trabajando en la *xenotrasplantación*, un proceso que permitirá a la gente recibir riñones de animales como los cerdos, cuyas células se hayan modificado genéticamente para evitar que el sistema inmunitario del receptor las rechace y ataque.

FIGURA E35-2 Una paciente en diálisis

acumulan hasta alcanzar niveles tóxicos en la sangre, una condición que es mortal si no se trata por medio de diálisis o de un transplante de riñón.

El asa de Henle permite la concentración de la orina

Los riñones de los mamíferos y las aves pueden producir orina con una concentración de materiales disueltos más alta que la de su sangre. La orina puede volverse más concentrada porque existe un gradiente de concentración de las sales disueltas y la urea en el líquido intersticial de la médula del riñón que rodea los conductos colectores. Este gradiente es producido por el **asa de Henle** diente de concentración que produce porque existe una mayor longitud de túbulo para sacar la sal hacia el líquido circundante (véase la figura E35-1, pasos ④ y ⑤

resto del aparato excretor no permite el ingreso de agua ni el escape de urea, la orina se mantiene concentrada.

Es importante producir orina concentrada cuando escasea el agua, y producir orina diluida cuando hay exceso de agua en la sangre. El grado de concentración de la orina depende de la permeabilidad al agua del conducto colector. Esto se controla con la cantidad de la *hormona antidiurética*, que describiremos más adelante.

35.5 ¿CÓMO AYUDAN LOS RIÑONES DE LOS MAMÍFEROS A CONSERVAR LA HOMEOSTASIS?

Cada gota de sangre del cuerpo pasa por un riñón aproximadamente 350 veces al día; así, el riñón puede ajustar finamente la composición de la sangre y mantener la homeostasis. La importancia de esta tarea queda de manifiesto por el hecho de que una falla renal causa la muerte en poco tiempo.

Los riñones regulan el contenido de agua de la sangre

Una función importante de los riñones es la de regular el contenido de agua de la sangre. Los riñones humanos extraen por filtración media taza de líquido de la sangre cada minuto. Si no hubiera reabsorción de agua, ¡produciríamos unos 190 litros de orina al día!, por lo que necesitaríamos beber agua continuamente. La reabsorción de agua se efectúa pasivamente por ósmosis mientras el filtrado pasa por el túbulo y el conducto colector.

La cantidad de agua reabsorbida por la sangre se controla con un mecanismo de retroalimentación negativa (véase el capítulo 31) en el que interviene la cantidad de **hormona antidiurética** (**ADH**; también llamada *vasopresina*) que circula en la sangre. Esta hormona es producida por las células secretoras del hipotálamo y se libera en la sangre *a través* de la glándula hipófisis (pituitaria) posterior (véase el capítulo 37). La liberación de ADH se desencadena cuando células receptoras del hipotálamo detectan un incremento en la osmolaridad de la sangre, y cuando los receptores en el corazón detectan un decremento en la presión arterial (ambos son síntomas de escasez de agua en la sangre). La hormona antidiurética aumenta la permeabilidad al agua del túbulo distal y del conducto colector, lo que permite reabsorber más agua de la orina. En respuesta a la unión de la ADH a los receptores en sus membranas plasmáticas, las células del túbulo distal y el conducto colector introducen proteínas de *acuaporina* ("poro de agua", en latín) a sus membranas, lo que aumenta su permeabilidad al agua (las acuaporinas se describieron en el capítulo 5).

Imagínate perdido en el desierto, avanzando tambaleante bajo el Sol abrasador; transpiras copiosamente y pierdes agua con cada exhalación. Conforme baja el volumen de la sangre, su osmolaridad aumenta, activando la liberación de ADH desde la glándula hipófisis. Esto aumenta la reabsorción de agua y produce orina más concentrada (FIGURA 35-7 ductos colectores menos permeables al agua, de manera que se reabsorbe relativamente poca agua después de que la orina sale del asa de Henle. Tu vejiga ahora comienza a llenarse con orina que está más diluida que tu sangre. En casos extremos, el flujo de orina podría exceder el litro por hora. Una vez que se restablece el nivel de agua en la sangre, su mayor osmolaridad y menor volumen estimulan la producción de ADH, lo que conserva la homeostasis al mantener el contenido de agua de la sangre dentro de estrechos límites.

Los riñones liberan hormonas que ayudan a regular la presión arterial y los niveles de oxígeno de la sangre

Cuando la presión arterial baja, los riñones liberan **renina** al torrente sanguíneo. La renina actúa como enzima catalizando la formación de una segunda hormona, la **angiotensina**, a partir de una proteína que circula en la sangre. La angiotensina, a la vez, hace que las arteriolas se constriñan y eleven la presión arterial. La constricción de las arteriolas que llevan sangre a los riñones también reduce la rapidez de filtración de la sangre y hace que se extraiga menos agua de ella. La retención de agua produce un incremento en el volumen de la sangre y, por consiguiente, un aumento en la presión arterial.

En respuesta a niveles bajos de oxígeno en la sangre, los riñones liberan una segunda hormona, la **eritropoyetina** (véase el capítulo 32). La eritropoyetina viaja por la sangre hasta la médula ósea, donde estimula la producción de glóbulos rojos, los cuales se encargan de transportar oxígeno. Una falla en los riñones casi siempre provoca anemia porque los riñones no

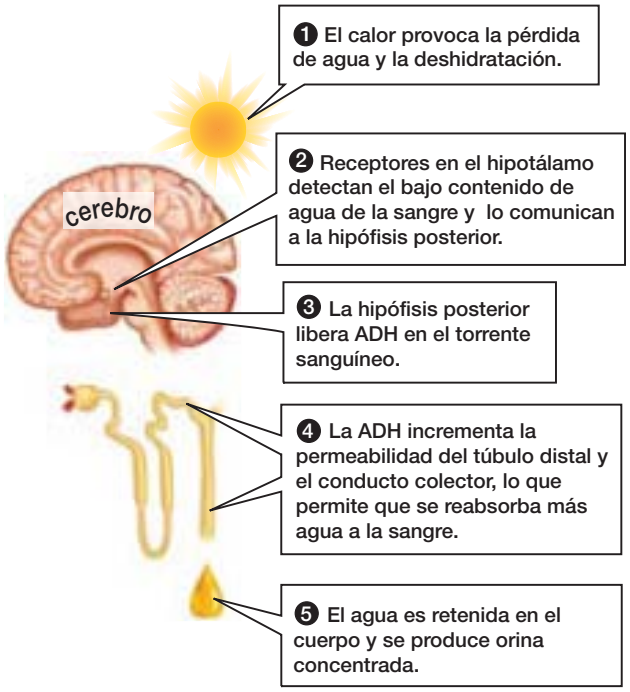

1 El calor provoca la pérdida de agua y la deshidratación.
2 Receptores en el hipotálamo detectan el bajo contenido de agua de la sangre y lo comunican a la hipófisis posterior.
cerebro
3 La hipófisis posterior libera ADH en el torrente sanguíneo.
4 La ADH incrementa la permeabilidad del túbulo distal y el conducto colector, lo que permite que se reabsorba más agua a la sangre.
5 El agua es retenida en el cuerpo y se produce orina concentrada.

FIGURA 35-7 La deshidratación estimula la liberación de ADH y la retención de agua
PREGUNTA: El alcohol inhibe la liberación de ADH. Explica cómo afectará el consumo de alcohol al equilibrio de agua en el cuerpo.

producen suficiente eritropoyetina para estimular la adecuada producción de glóbulos rojos. Los médicos actuales prescriben eritropoyetina humana elaborada mediante técnicas de ingeniería genética a los pacientes que padecen anemia provocada por una deficiencia renal.

Los riñones vigilan y regulan las sustancias disueltas en la sangre

Mientras los riñones filtran la sangre, vigilan y regulan su composición, además de ajustar la secreción tubular y la rapidez de reabsorción, con el fin de mantener un entorno interno constante. Entre las sustancias que los riñones regulan, además del agua, están nutrimentos como glucosa, aminoácidos, vitaminas, urea y diversos iones, como sodio, potasio, cloruro y sulfato. Los riñones mantienen un pH constante en la sangre regulando la cantidad de iones hidrógeno y de bicarbonato de sodio que se secretan a la orina. Estos notables órganos también eliminan sustancias potencialmente nocivas, como ciertos fármacos, aditivos de alimentos, plaguicidas y sustancias tóxicas del humo del cigarro, como la nicotina.

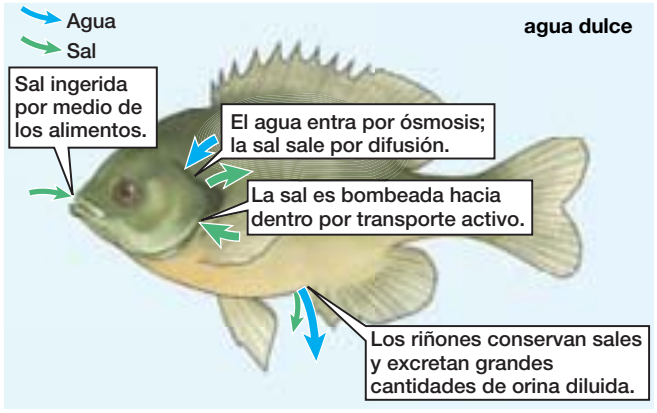
Los riñones de los vertebrados están adaptados a diversos entornos

Los entornos de agua dulce y agua salada representan desafíos especiales

Los animales que se encuentran continuamente inmersos en una solución que tiene una osmolaridad menor o mayor que los líquidos de sus cuerpos han desarrollado mecanismos especiales para mantener el equilibrio del agua y la sal dentro de sus organismos. Este proceso se llama **osmorregulación**. Los peces de agua dulce, por ejemplo, viven en un ambiente *hipotónico*; sus cuerpos mantienen concentraciones de sustancias disueltas que son entre 4 y 6 veces la osmolaridad de su entorno de agua dulce. A medida que estos peces hacen circular el agua sobre sus branquias para intercambiar gases, algo de agua se filtra a sus cuerpos de manera continua por ósmosis, mientras las sales se expelen por difusión. Para compensar la pérdida de sales, los peces de agua dulce tienen proteínas de transporte activo en sus branquias, que utilizan energía para bombear la sal a sus cuerpos desde el entorno poco concentrado, en contra de su gradiente de concentración. Para compensar por la entrada de exceso de agua, los peces de agua dulce nunca beben, y sus riñones pueden excretar grandes cantidades de orina sumamente diluida. Su alimento también les provee sales, las cuales son reabsorbidas por los riñones mediante el transporte activo (**FIGURA 35-8a**).

Los peces de agua salada, que viven en un ambiente *hipertónico*

a) Pez de agua dulce (perca azul)


Agua
Sal
agua dulce
Sal ingerida por medio de los alimentos.
El agua entra por ósmosis; la sal sale por difusión.
La sal es bombeada hacia dentro por transporte activo.
Los riñones conservan sales y excretan grandes cantidades de orina diluida.

b) Pez de agua salada (garibaldi)

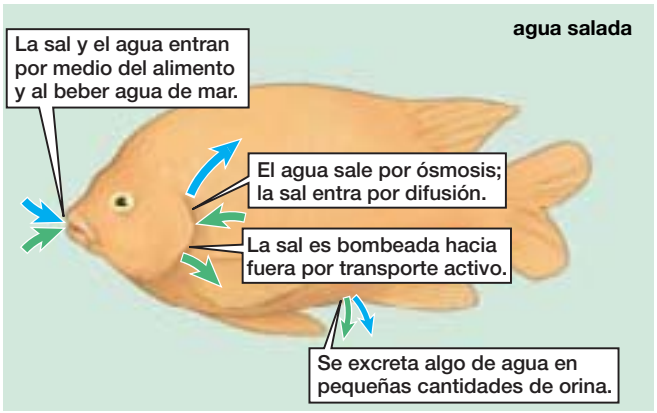

agua salada
La sal y el agua entran por medio del alimento y al beber agua de mar.
El agua sale por ósmosis; la sal entra por difusión.
La sal es bombeada hacia fuera por transporte activo.
Se excreta algo de agua en pequeñas cantidades de orina.

FIGURA 35-8 Osmorregulación en los peces

sal que sus branquias no logran eliminar (**FIGURA 35-8b**). El continuo requerimiento de transporte activo en los peces de agua dulce y de agua salada significa que, en ambos ambientes, los peces utilizan cantidades sustanciales de energía en la osmorregulación.

La clase de peces marinos que incluye a los tiburones y las rayas tiene una forma diferente de efectuar la osmorregulación. Estos peces almacenan grandes cantidades de urea en sus tejidos, que sería suficiente para matar a casi cualquier vertebrado. La urea almacenada confiere a sus tejidos aproximadamente la misma osmolaridad del agua de mar en la que están inmersos, lo que evita la pérdida de agua por ósmosis.

Las asas de Henle determinan la capacidad para concentrar orina de los mamíferos

ENLACES CON LA VIDA ¿Demasiado líquido para beber?

Quienes consumen alcohol seguramente han observado que el volumen de la orina que producen después de beber parece exceder el volumen de líquidos que ingirieron. ¿Por qué? Uno de los muchos efectos del alcohol es que se inhibe la liberación de ADH, y sin esta hormona, la orina es muy diluida. Como el alcohol hace excretar más orina de la necesaria para recuperar el equilibrio de agua, irónicamente, "beber demasiado líquido" en realidad puede provocar una deshidratación.

Por otra parte, muchas personas beben más agua de la que necesitan. Quizá hayas escuchado el consejo de que "Siempre hay que beber agua antes de tener sed", o "Toma dos litros de agua cada día además de otros líquidos". Para deleite de la industria del agua embotellada, muchos están tomando en serio estos consejos. Para la gente saludable con dietas normales, beber antes de sentir sed es completamente innecesario: la evolución ha sincronizado nuestro deseo de beber con nuestras necesidades de líquido. Por otra parte, en casos extremos, beber demasiado líquido es peligroso. Si el cuerpo acumula agua a un ritmo más rápido que el de los riñones para eliminarla, sales importantes (particularmente el sodio) en el líquido intersticial se diluyen y un exceso de agua entra en las células por ósmosis. En el cerebro un exceso de agua provoca inflamación, que puede ser mortal. Un estudio con participantes en la Maratón de Boston en 2002 concluyó que el 13 por ciento de ellos probablemente ingirieron cantidades peligrosas de líquido en un intento equivocado por mantenerse hidratados; y trágicamente, un participante de 28 años murió como resultado de ello. La conclusión: siempre hay que poner en práctica la moderación.

colectores. Como cabe esperar, los animales que viven en climas muy secos o con altas concentraciones de sal tienen asas de Henle más largas (como los mamíferos marinos, por ejemplo, las ballenas) y los que viven en ambientes húmedos tienen asas relativamente cortas.

El castor, por ejemplo, sólo tiene nefronas de asa corta y no puede concentrar su orina a más del doble de la osmolaridad de su sangre. Los riñones humanos tienen una combinación de nefronas de asa corta y de asa larga y pueden concentrar la orina a unas cuatro veces la osmolaridad de la sangre. Los campeones de la concentración de orina son los roedores del desierto como la rata canguro, que puede producir orina con una concentración 14 veces mayor que la osmolaridad de su sangre (**FIGURA 35-9**). Como es de esperar, estos animales sólo tienen nefronas de asa muy larga. Gracias a su extraordinaria capacidad para ahorrar agua, no necesitan beber; dependen por completo del agua que ingieren junto con su alimento y de las reacciones metabólicas que producen agua.

FIGURA 35-9 Una adaptación a un entorno seco
La rata canguro de los desiertos del suroeste de Estados Unidos rara vez toma agua, en parte gracias a que sus largas asas de Henle le permiten producir orina muy concentrada.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO COMPATIBILIDAD PERFECTA

Cuando Cherry, la hija de Kay Burt, se enteró de que su madre sería dependiente de la hemodiálisis por el resto de su vida, inmediatamente ofreció uno de sus riñones. La extraordinaria suerte de Kay continuó; pese a que los doctores habían recomendado a Kay no tener descendencia, su hija resultó ser compatible. El segundo trasplante de Kay, 32 años después del primero, fue otro éxito; hizo historia al recibir riñones trasplantados de su padre y de su hija.

En la actualidad son comunes los trasplantes de riñones tanto de donadores vivos como fallecidos recientemente. Por fortuna, el número de donadores vivos va en aumento, y los estudios indican que los trasplantes de donadores no emparentados, pero compatibles, tienen un elevado índice de éxito. (Una compatibilidad ideal entre donador y receptor se basa en tener el mismo tipo de sangre genéticamente determinado y de proteínas tisulares). Los receptores de riñones procedentes de donadores vivos tienen mejores tasas de supervivencia a largo plazo. Algunos centros de trasplante utilizan ahora la cirugía endoscópica para extraer los riñones de los donadores vivos. Esta técnica, en la que el cirujano ve la operación a través de una diminuta cámara insertada en el cuerpo, permite extraer el riñón a través de una incisión de unos 7.5 centímetros de longitud, en contraste con la incisión de 23 centímetros en los métodos tradicionales. La cirugía endoscópica reduce drásticamente el dolor, el tiempo de hospitalización y el tiempo de recuperación del donador.

Piensa en esto Supongamos que leíste en un periódico local que una familia está buscando un donador de riñón para su hijo. No conoces a la familia. ¿Estarías dispuesto a hacerte una prueba de compatibilidad y, en caso de resultar compatible, donarías un riñón?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

35.1 ¿Cuáles son las funciones básicas de los sistemas urinarios?

Todos los sistemas urinarios (excretores) realizan funciones similares mediante los mismos procesos básicos. Primero se filtra la sangre u otro líquido que baña las células, eliminando el agua y pequeñas moléculas disueltas; segundo, los nutrimentos se reabsorben selectivamente a partir del filtrado; y tercero, el agua restante y los desechos disueltos se excretan del cuerpo.

35.2 ¿Cuáles son algunos ejemplos de sistemas excretores de invertebrados?

El sencillo sistema excretor de los platelmintos consiste en una red de túbulos que se ramifican por todo el cuerpo y recolectan desechos y agua en exceso para eliminarlos por poros excretores. Los insectos usan los túbulos de Malpighi para filtrar la sangre en el hemocele de su sistema circulatorio, y liberan orina concentrada en el intestino para su eliminación. Las lombrices de tierra y los moluscos emplean nefridios, que se parecen a las nefronas de los vertebrados, para filtrar el líquido intersticial que llena la cavidad corporal. Los desechos y el exceso de agua se expulsan por el poro excretor.

35.3 ¿Qué funciones tienen los sistemas urinarios de los vertebrados?

Los sistemas urinarios eliminan los desechos celulares y las sustancias tóxicas mientras retienen nutrimentos esenciales en la sangre. El sistema urinario desempeña un papel crucial en la homeostasis, pues regula el contenido de agua y de iones de la sangre, así como su pH. También secreta hormonas como la eritropoyetina, que estimula la producción de glóbulos rojos.

35.4 ¿Cuáles son las estructuras y funciones del aparato urinario humano?

El aparato urinario humano consta de riñones, uréteres, vejiga y uretra. Los riñones producen orina, que los uréteres llevan a la vejiga, un órgano de almacenamiento. La distensión de la pared muscular de la vejiga activa la micción, durante la cual la orina sale del cuerpo a través de la uretra.

Cada riñón consiste en más de un millón de nefronas individuales en una capa exterior, la cual consta de la médula renal y la corteza renal que se encuentra encima. La orina que se forma en las nefronas pasa a conductos recolectores que recorren la médula y desembocan en la pelvis renal, de donde se dirige al uréter.

Cada nefrona es abastecida por una arteriola que se ramifica de la arteria renal. La arteriola se ramifica después para formar una masa de capilares con paredes porosas llamada glomérulo. Ahí, agua y sustancias disueltas se filtran de la sangre mediante presión. El filtrado se recolecta en la cápsula de Bowman, que tiene forma de taza, y se conduce por la porción tubular de la nefrona. Durante la reabsorción tubular, se bombean activamente nutrimentos hacia fuera de las paredes del túbulo. De ahí, los nutrimentos entran en los capilares que rodean al túbulo y el agua los sigue por ósmosis. Algunos desechos permanecen en el filtrado; otros se bombean activamente hacia el interior del túbulo por secreción tubular. El túbulo forma el asa de Henle, que crea un gradiente de concentración de sales en derredor suyo. Después de completar su paso por el túbulo, el filtrado entra en el conducto colector, que pasa por el gradiente de concentración en la médula del riñón. Durante su paso (si la ADH está presente) el agua sale de la orina, la cual puede volverse cuatro veces tan concentrada como la sangre. En ausencia de ADH, la orina permanece diluida.

Web tutorial 35.1 Los riñones de los mamíferos

35.5 ¿Cómo ayudan los riñones de los mamíferos a conservar la homeostasis?

Los riñones son órganos importantes para la homeostasis. El contenido de agua de la sangre se regula con la hormona antidiurética (ADH) que se produce en el hipotálamo y es liberada por la glándula hipófisis posterior. La deshidratación estimula la liberación de ADH, que aumenta la absorción de agua a la sangre a través del túbulo distal y el conducto colector. Los riñones también controlan el pH de la sangre, eliminan sustancias tóxicas y regulan los iones como sodio, cloruro, potasio y sulfato. Los riñones excretan el exceso de glucosa, vitaminas y aminoácidos.

Los riñones también secretan hormonas. La renina, liberada en respuesta a una presión arterial baja, cataliza la formación de angiotensina, la cual constriñe las arteriolas y eleva la presión arterial. La eritropoyetina, liberada cuando el contenido de oxígeno de la sangre disminuye, estimula a la médula ósea para que produzca glóbulos rojos.

Los riñones de los mamíferos están adaptados a los ambientes en los que viven. Animales como los castores, que viven en lugares donde el agua abunda, tienen asas de Henle cortas y producen orina diluida, mientras que los animales del desierto presentan asas de Henle muy largas y producen orina sumamente concentrada.

TÉRMINOS CLAVE

ácido úrico *pág. 710*
amoniaco *pág. 709*
angiotensina *pág. 715*
arteria renal *pág. 710*
asa de Henle *pág. 714*
cápsula de Bowman *pág. 711*
conducto colector *pág. 711*
corteza renal *pág. 710*
eritropoyetina *pág. 715*
excreción *pág. 708*
filtración *pág. 712*
filtrado *pág. 712*
glomérulo *pág. 711*
hemodiálisis *pág. 714*
homeostasis *pág. 708*
hormona antidiurética (ADH) *pág. 715*
líquido intersticial *pág. 708*
médula renal *pág. 710*
nefridio *pág. 709*
nefridioporo *pág. 709*
nefrona *pág. 710*
nefrostoma *pág. 709*
orina *pág. 709*
osmolaridad *pág. 708*
osmorregulación *pág. 716*
pelvis renal *pág. 710*
protonefridio *pág. 708*
reabsorción tubular *pág. 712*
renina *pág. 715*
riñón *pág. 709*
secreción tubular *pág. 713*
sistema urinario *pág. 708*
túbulo *pág. 711*
túbulos de Malpighi *pág. 709*
urea *pág. 710*
uréter *pág. 710*
uretra *pág. 710*
vejiga *pág. 710*
vena renal *pág. 710*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Explica las dos funciones principales de los sistemas urinarios.
2. Describe la trayectoria de una molécula de urea en el cuerpo de un mamífero, comenzando con una molécula de amoniaco en el torrente sanguíneo hasta que sale del cuerpo.
3. ¿Qué función desempeña el asa de Henle? ¿El conducto colector? ¿La hormona antidiurética?
4. Describe y compara los procesos de filtración, reabsorción tubular y secreción tubular.
5. Describe el papel de los riñones como órganos de homeostasis.
6. Compara y contrasta los sistemas excretores del ser humano, la lombriz de tierra y los platelmintos. ¿En qué aspectos generales son similares? ¿En qué difieren?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Comenta las diferencias en función de los dos principales lechos de capilares de los riñones: los capilares glomerulares y los que rodean a los túbulos.
2. Explica por qué una ballena tiene nefronas con asas de Henle largas. ¿Qué esperarías acerca de las asas de Henle en una foca? ¿Y de una nutria de río?
3. Algunas dietas para "bajar rápidamente de peso" requieren la ingestión de alimentos ricos en proteínas y bajos en carbohidratos; además requieren que la persona que se somete a ellas beba más agua de la habitual. Explica por qué es importante esta agua adicional.
4. En su poema "La rima del viejo marinero", Samuel Taylor Coleridge escribió: "Agua, agua por doquier y ni una gota para beber". El agua de mar tiene más de cuatro veces la osmolaridad de la sangre. ¿Por qué una persona no puede evitar la muerte por sed tomando agua de mar?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Graham-Rowe, D. "Army Rations Rehydrated with Urine". *New Scientist*, 21 de julio de 2004. Una ración con un filtro especial permitirá a los soldados rehidratar la comida con agua lodosa o incluso con orina en una emergencia.

Khamsi, R. "Bio-engineered Bladders Successful in Patients". *New Scientist*, 4 de abril de 2006. Las células del propio paciente, cultivadas en un molde biodegradable, pueden utilizarse para remplazar una vejiga que funciona de manera deficiente.

Seppa, N. "Homegrown Defender". *New Scientist*, 10 de junio de 2006. Los científicos descubrieron un péptido que defiende el tracto urinario de las infecciones.

CAPÍTULO 36

Defensas contra la enfermedad

Un estornudo arroja miles de gotitas microscópicas de la nariz y la boca con una rapidez de ¡320 kilómetros por hora! En un simple estornudo se liberan unas 100,000 bacterias; los virus también se esparcen de esta manera.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Lucha contra la gripe

36.1 ¿Cuáles son los mecanismos de defensa básicos contra la enfermedad?

Los vertebrados tienen tres principales líneas de defensa

Los invertebrados poseen las dos primeras líneas de defensa

36.2 ¿Cómo funcionan las defensas no específicas?

La piel y las membranas mucosas forman barreras externas contra la invasión

Defensas internas no específicas combaten a los microbios

36.3 ¿Qué características clave tiene la respuesta inmunitaria?

Las células del sistema inmunitario reconocen al invasor

Las células del sistema inmunitario lanzan un ataque

Las células del sistema inmunitario recuerdan sus victorias anteriores

36.4 ¿Cómo logra la atención médica mejorar la respuesta inmunitaria?

Las vacunas estimulan el desarrollo de células de memoria

Investigación científica: El descubrimiento de las vacunas

Los antibióticos frenan la reproducción microbiana

36.5 ¿Qué sucede cuando el sistema inmunitario no funciona correctamente?

Las alergias son respuestas inmunitarias mal dirigidas

Guardián de la salud: El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar?

Una enfermedad autoinmune es una respuesta inmunitaria contra las moléculas del propio cuerpo

Una enfermedad de deficiencia inmunitaria incapacita al sistema inmunitario

El cáncer puede evadir o abatir la respuesta inmunitaria

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Lucha contra la gripe

ESTUDIO DE CASO LUCHA CONTRA LA GRIPE

¿ALGUNA VEZ TE HA PASADO que estando en clase, la compañera de al lado estornuda estrepitosamente? Al tomar aire para decirle: "Salud", tú inhalas sin querer miles de gotitas microscópicas cargadas de "gérmenes", que pueden ser virus del resfriado común, virus de la gripe y bacterias de la floreciente población que vive en la nariz y la boca de todos nosotros. Los síntomas de un resfriado y de algunos tipos de gripe —estornudos, tos y flujo nasal— son ideales para diseminar estos microorganismos. De hecho, la selección natural favorece a los virus que causan síntomas que les ayudan a propagarse a otras víctimas.

Después de clase, la compañera que estornudó admite que se ha estado sintiendo "con el cuerpo cortado" y con fiebre. De acuerdo con tus experiencias pasadas con síntomas similares, le aconsejas que se vaya a su casa, que tome aspirina y se recueste. Te das cuenta de que el estornudo de tu compañera pudo haberte expuesto al mismo virus que causó su enfermedad. Al recordar la fuerte gripe que tuviste el año pasado, deseas fervientemente estar inmunizado. ¿Deberías ir de inmediato a que te apliquen una inyección contra la gripe? ¿Acaso tendrá gripe aviar de la que tanto se habla? Si es así, ¿cuáles son sus síntomas? ¿Cuál es la probabilidad de que alguien en tu grupo la tenga? ¿Existe alguna vacuna activa para esa enfermedad? ¿Tu sugerencia de que se tomara una aspirina fue un buen consejo? ¿Cómo reaccionará tu cuerpo ante todos los microbios que inhalaste sin querer?

36.1 ¿CUÁLES SON LOS MECANISMOS DE DEFENSA BÁSICOS CONTRA LA ENFERMEDAD?

Nuestro ambiente está repleto de organismos microscópicos o **microbios**, que incluyen virus, bacterias, hongos y protistas. La mayoría de ellos no son dañinos, pero algunos son **parásitos**, es decir, organismos que viven sobre el cuerpo de otros o dentro de él y que causan daño a sus huéspedes. Los microbios que causan enfermedades se describen como **patógenos**, y nuevos organismos patógenos están apareciendo con asombrosa regularidad. Desde principios de la década de 1980, varios virus surgieron como amenazas a los seres humanos: el VIH, el virus del Ébola, el hantavirus y, más recientemente, el virus del Nilo occidental y el SARS (síndrome agudo respiratorio severo). Hemos sido testigos del surgimiento de cepas relativamente raras pero mortales de la común bacteria intestinal *Escherichia coli* y de la bacteria respiratoria *Streptococcus pyogenes* ("bacteria comedora de carne"). Mientras tanto, cientos de cepas del "virus del resfriado" y cepas mutantes del virus de la influenza (gripe) continúan amenazándonos.

Ante la prevalencia y diversidad de organismos causantes de enfermedades, quizá te preguntes: "¿Por qué no nos enfermamos con mayor frecuencia?" A lo largo del tiempo evolutivo, los animales y sus parásitos han entrado en una batalla cada vez más intensa. Conforme los animales desarrollan sistemas de defensa más complejos, los parásitos, por su parte, desarrollan tácticas más efectivas para combatir esas defensas. Esta "carrera armamentista evolutiva" ha perfeccionado nuestras defensas hasta convertirlas en un sistema extraordinariamente complejo, diseñado para resistir las invasiones y los ataques de los parásitos.

Los vertebrados tienen tres principales líneas de defensa

Los vertebrados (los animales con espina dorsal) han desarrollado tres formas principales de protección contra las enfermedades: *barreras externas no específicas, defensas internas no específicas* y *defensas internas específicas*, también conocidas con el nombre de respuesta inmunitaria (FIGURA 36-1). Primero, el cuerpo se defiende con barreras externas no específicas que impiden la entrada a la mayoría de los microbios causantes de enfermedades. Estas barreras son estructuras anatómicas como la piel, el cabello, cilios y secreciones como lágrimas, saliva y moco. Tales barreras cubren el cuerpo y revisten las cavidades corporales que están en continuo contacto con el exterior, por ejemplo, las superficies de los tractos respiratorio, digestivo y urogenital. Segundo, si las barreras externas son traspasadas, una variedad de defensas internas no específicas entran en acción. Algunos glóbulos blancos fagocitan las partículas extrañas o destruyen las células infectadas. Las sustancias químicas liberadas por las células corporales dañadas y las proteínas liberadas por los glóbulos blancos son responsables de la inflamación y la *fiebre* (en los animales que regulan su temperatura corporal), las cuales también impiden la infección. Tanto las barreras no específicas como las defensas internas no específicas operan sin importar la naturaleza exacta del invasor, al repeler, exterminar o neutralizar la amenaza. La tercera y última línea de defensa consiste en defensas internas específicas o **respuesta inmunitaria**, en la que las células inmunitarias destruyen selectivamente la toxina o el microbio en particular y luego "recuerdan" al invasor, lo que permite una respuesta más rápida si éste reaparece en el futuro.

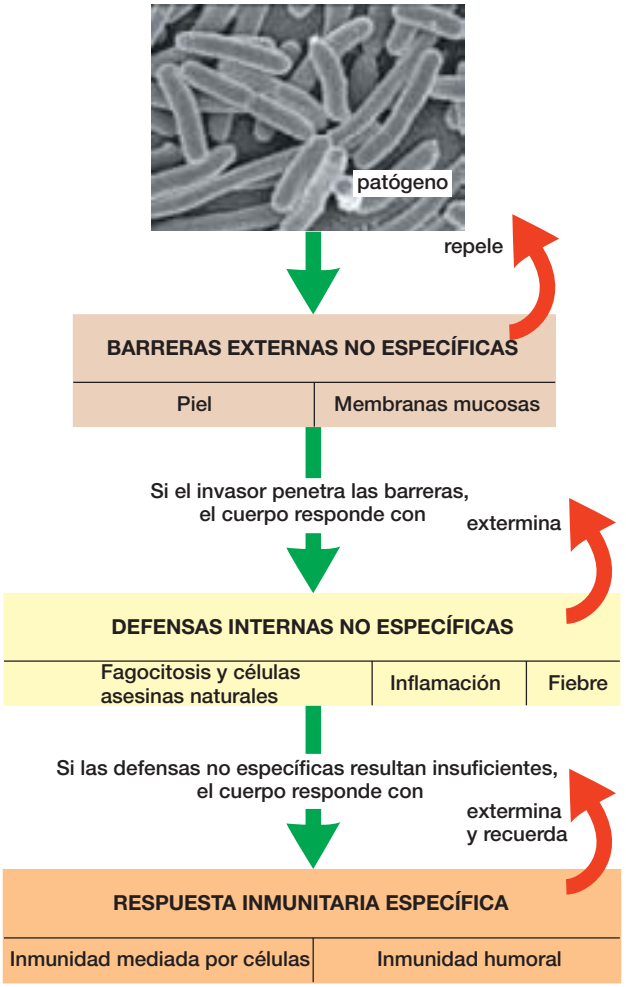


FIGURA 36-1 Niveles de defensa contra infecciones

Los invertebrados poseen las dos primeras líneas de defensa

Los invertebrados fueron los primeros animales en evolucionar y su número sobrepasa por mucho al de los vertebrados, pero los investigadores saben muy poco acerca de sus sistemas defensivos. Los científicos han encontrado que el sistema relativamente simple de los invertebrados depende por completo de dos líneas no específicas de defensa hasta ahora descritas. Los invertebrados presentan una enorme gama de barreras físicas, que van desde los esqueletos externos a una variedad de secreciones de consistencia babosa. Internamente, los invertebrados tienen glóbulos blancos que atacan a los organismos patógenos y secretan proteínas para neutralizar a estos invasores o las toxinas que liberan. De manera in-

FIGURA 36-2 Un cangrejo herradura

teresante, los investigadores han encontrado proteínas muy similares en la sangre de los vertebrados (incluidos los seres humanos) y un invertebrado como el cangrejo herradura (*Limulus*; FIGURA 36-2). En estos diversos organismos, las proteínas ayudan a proteger de las infecciones. Este hallazgo sugiere que los genes que codifican estas moléculas han pasado a través de un linaje evolutivo de animales durante cientos de millones de años y parecen ser sumamente importantes en el combate a las infecciones.

Las defensas internas específicas del sistema inmunitario surgieron con los vertebrados. Aunque algunos textos incluyen algunas defensas no específicas como parte del "sistema inmunitario" y analizan los "sistemas inmunitarios de los invertebrados", aquí definimos el término más estrechamente. Pese a que los invertebrados tienen muchas y muy efectivas defensas contra las enfermedades, carecen de defensas específicas para enfermedades particulares, de manera que, de acuerdo con nuestra definición, carecen de sistema inmunitario.

36.2 ¿CÓMO FUNCIONAN LAS DEFENSAS NO ESPECÍFICAS?

La piel y las membranas mucosas forman barreras externas contra la invasión

La mejor estrategia de defensa consiste, antes que nada, en impedir que los invasores ingresen al organismo. En el cuerpo animal, esta primera línea de defensa corre por cuenta de las dos superficies que están expuestas al ambiente: la *piel* y las *membranas mucosas* de los tractos digestivo, respiratorio y urogenital.

La piel y sus secreciones bloquean la entrada y proveen un ambiente inhóspito para el crecimiento microbiano

Las gotitas cargadas de virus y bacterias arrojadas por el compañero de al lado que caen sobre la piel encontrarán una superficie exterior formada por células muertas y secas. Casi ninguno de esos microorganismos obtendrá el agua y los nutrimentos que necesita para sobrevivir. Las pocas bacterias y hongos que logren afianzarse sobre la piel por lo regular se desecharán antes de que puedan causar daño, porque las células epiteliales continuamente se están desprendiendo al ser remplazadas desde abajo. Las secreciones de las glándulas sudoríparas, sebáceas (productoras de aceite) y céreas (en el conducto auditivo externo) contienen antibióticos naturales que inhiben el crecimiento de bacterias extrañas al cuerpo. Estas múltiples defensas hacen que la piel íntegra sea una barrera sumamente eficaz contra la invasión microbiana.

Las secreciones antimicrobianas, el moco y la acción ciliar defienden a las membranas mucosas contra los microbios

Las tibias y húmedas membranas mucosas que rodean los ojos y que revisten los tractos digestivo, respiratorio y urogenital son mucho más favorables para los microbios que la piel, pero también poseen mecanismos de defensa eficaces. El moco y las lágrimas secretadas por estas membranas contienen enzimas antibacterianas, llamadas *lisozimas*

Los cilios de las membranas que revisten las vías respiratorias barren el moco, junto con las partículas atrapadas, hasta la nariz y la boca donde se expulsa por medio de un estornudo o una tos, o se traga. Si los microbios son tragados, llegan al estómago, donde encuentran tanto acidez extrema como enzimas que digieren proteínas, las cuales pueden matar muchos tipos de microbios. Más adelante en el tracto digestivo, el intestino está habitado por bacterias que son inocuas en su hábitat intestinal, pero que secretan sustancias capaces de destruir bacterias u hongos invasores. En el tracto urinario, la leve acidez de la orina inhibe el crecimiento de bacterias. En las mujeres, las secreciones ácidas y el moco ayudan a proteger la vagina. Pese a estas defensas, muchos organismos patógenos logran ingresar en el cuerpo a través de las membranas mucosas. Por ejemplo, al inhalar los productos del estornudo, muchos virus ingresan en nuestros pulmones y es probable que algunos logren penetrar las vulnerables membranas. Veamos qué sucede después.

Defensas internas no específicas combaten a los microbios

Los parásitos invasores que penetran la piel y las membranas mucosas se encuentran con una serie de defensas internas. Algunas de esas defensas no son específicas, es decir, atacan a una amplia variedad de microbios en vez de poner la mira en invasores específicos. Las defensas no específicas pertenecen a una de tres categorías principales. Primero, el cuerpo cuenta con un ejército permanente de glóbulos blancos o **leucocitos**, algunos de los cuales se especializan en atacar y destruir células extrañas. Segundo, una lesión, con su combinación de tejidos dañados e invasión relativamente masiva de microbios, provoca una *respuesta inflamatoria* que hace entrar a los leucocitos en escena. Tercero, si ocurre una infección importante, el cuerpo puede generar **fiebre**, es decir, una temperatura elevada que frene la reproducción microbiana y, al mismo tiempo, aumente la capacidad del cuerpo para combatirla.

Las células fagocíticas y asesinas naturales destruyen a los microbios invasores

El cuerpo contiene varios tipos de glóbulos blancos, llamados **fagocitos**, capaces de ingerir a los invasores extraños y dese-

FIGURA 36-3 La función protectora del moco
El epitelio ciliado y cubierto de moco que reviste las vías respiratorias atrapa microbios y partículas extrañas.

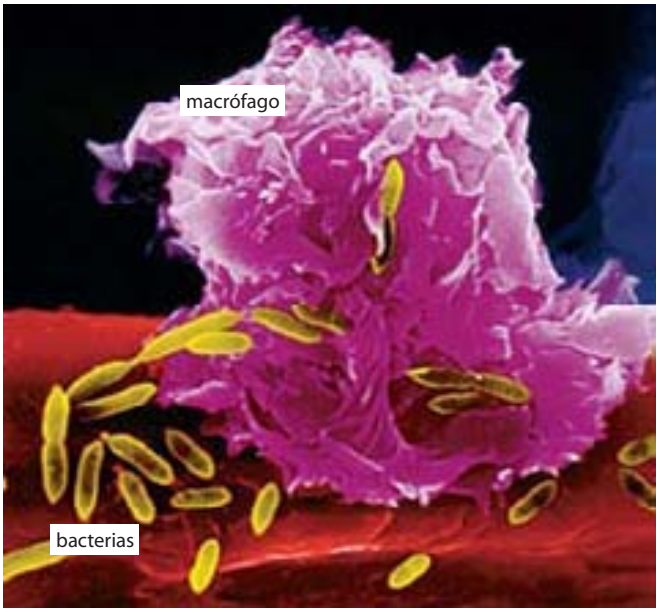


FIGURA 36-4 Un macrófago en pleno ataque
Este macrófago (en púrpura) está muy ocupado fagocitando bacterias (en verde).

chos celulares por fagocitosis. Dos tipos importantes de leucocitos son los **macrófagos** y los **neutrófilos**. Ambos viajan por el torrente sanguíneo, atraviesan las paredes capilares y vigilan los tejidos corporales. Los macrófagos (literalmente "grandes devoradores") y los neutrófilos consumen bacterias y sustancias extrañas que penetran las delicadas membranas mucosas del cuerpo (**FIGURA 36-4**). Los macrófagos también actúan como vigilantes y comen células muertas o en proceso de muerte, que se producen porque el cuerpo continuamente está renovando sus tejidos y sufre varios traumas. Si estas células muertas no son ingeridas, el contenido que se fuga de ellas podría dañar las células saludables cercanas. Como veremos más adelante, los macrófagos también desempeñan un papel crucial en la respuesta inmunitaria al mostrar proteínas de los patógenos que ingirieron en sus membranas plasmáticas, de manera que las células del sistema inmunitario puedan identificar y responder a estos invasores.

Las **células asesinas naturales** son otra clase de glóbulos blancos. En general, estas células atacan a las células del propio cuerpo que se han vuelto cancerosas o que han sido invadidas por virus, al reconocerlas por medio de las moléculas anormales en sus superficies. Las células infectadas por virus adquieren proteínas virales, y las células cancerosas llevan consigo moléculas atípicas en sus membranas plasmáticas. En vez de fagocitar a sus víctimas (como hacen los neutrófilos y los macrófagos), las células asesinas naturales liberan proteínas que perforan agujeros en la membrana de las células infectadas o cancerosas y luego secretan enzimas a través de estos agujeros. Perforadas y luego atacadas por las enzimas, estas células no tardan en morir.

La respuesta inflamatoria atrae fagocitos al tejido infectado o lesionado

Ya sea que te contagies de gripe por el estornudo de un compañero de clase o que accidentalmente sufras un rasguño (importante de las defensas del cuerpo internas y no específicas. La **respuesta inflamatoria** provoca que los tejidos lesionados se enrojezcan, se inflamen, se calienten y duelan (inflamación literalmente significa "incendio"). Este mecanismo de defensa tiene varias funciones: atrae fagocitos al área, promueve la coagulación de la sangre y provoca dolor que estimula comportamientos de protección.

Como se observa en la figura 36-5, las células dañadas por los patógenos o por un traumatismo inician una respuesta inflamatoria. Estas células dañadas liberan sustancias que hacen que las células del tejido conectivo, llamadas **mastocitos**, liberen **histamina** (y otras sustancias químicas) en el área herida. La histamina es una sustancia que hace que las paredes de los capilares se vuelvan muy permeables y relaja el músculo liso que rodea a las arteriolas para aumentar el flujo de sangre. El mayor volumen de sangre que fluye por los capilares permeables obliga al líquido a salir hacia los tejidos que rodean la herida. Otros mensajeros químicos liberados por las células heridas y los mastocitos, así como algunas sustancias producidas por los microbios mismos, atraen a macrófagos y neutrófilos hacia la herida. Algunas de las células fagocíticas salen a través de las paredes capilares e ingieren a las bacterias, las partículas de suciedad y los desechos celulares causados por la herida (véase la figura 36-4 y 36-5). En el caso de una herida sucia, se acumula *pus*, una mezcla espesa de bacterias muertas, residuos de tejidos y glóbulos blancos vivos y muertos. Los macrófagos liberan **citocinas**, moléculas proteicas mensajeras que permiten a las células comunicarse entre sí para responder a los organismos patógenos y sustancias extrañas. Estas citocinas complementan a la histamina en su labor de hacer porosos a los capilares, atrayendo más leucocitos al área y ayudándolos a penetrar a través de las paredes capilares.

Los tejidos inflamados y adoloridos en la garganta de una víctima de gripe y las secreciones fluidas que provocan estornudos, flujo nasal y tos son un resultado directo de la respuesta inflamatoria. Además, los capilares porosos y las células lesionadas liberan sustancias químicas que conducen a la coagulación de la sangre para bloquear los vasos sanguíneos dañados (véase el capítulo 32). La coagulación sella la herida frente al mundo exterior y evita que entren más microbios. Por último, las sensaciones de dolor, activadas por la inflamación y las sustancias químicas liberadas por el tejido lesionado alertan a la persona herida (o al animal) para que proteja el área de cualquier daño ulterior.

La fiebre combate infecciones a gran escala

Si los invasores penetran otras defensas y organizan una infección a gran escala, pueden provocar una fiebre, como ocurre cuando se contrae gripe. Aunque las fiebres intensas pueden ser peligrosas, e incluso las moderadas suelen ser muy desagradables, forman parte de las defensas del cuerpo contra las infecciones. El hipotálamo, que es la parte del cerebro donde están las células sensoras de temperatura que actúan como termostato del cuerpo, controla el inicio de la fiebre. En los humanos el "termostato" está fijado a unos 37°C (98.6°F). Ciertos macrófagos, al responder a la infección, liberan unas citocinas llamadas *pirógenos endógenos* ("productores de fuego generados internamente"). Estas citocinas viajan por el torrente sanguíneo al hipotálamo y elevan el punto fijo del termostato, lo que origina respuestas que elevan la temperatura del cuerpo. Estas respuestas incluyen un mayor metabo-

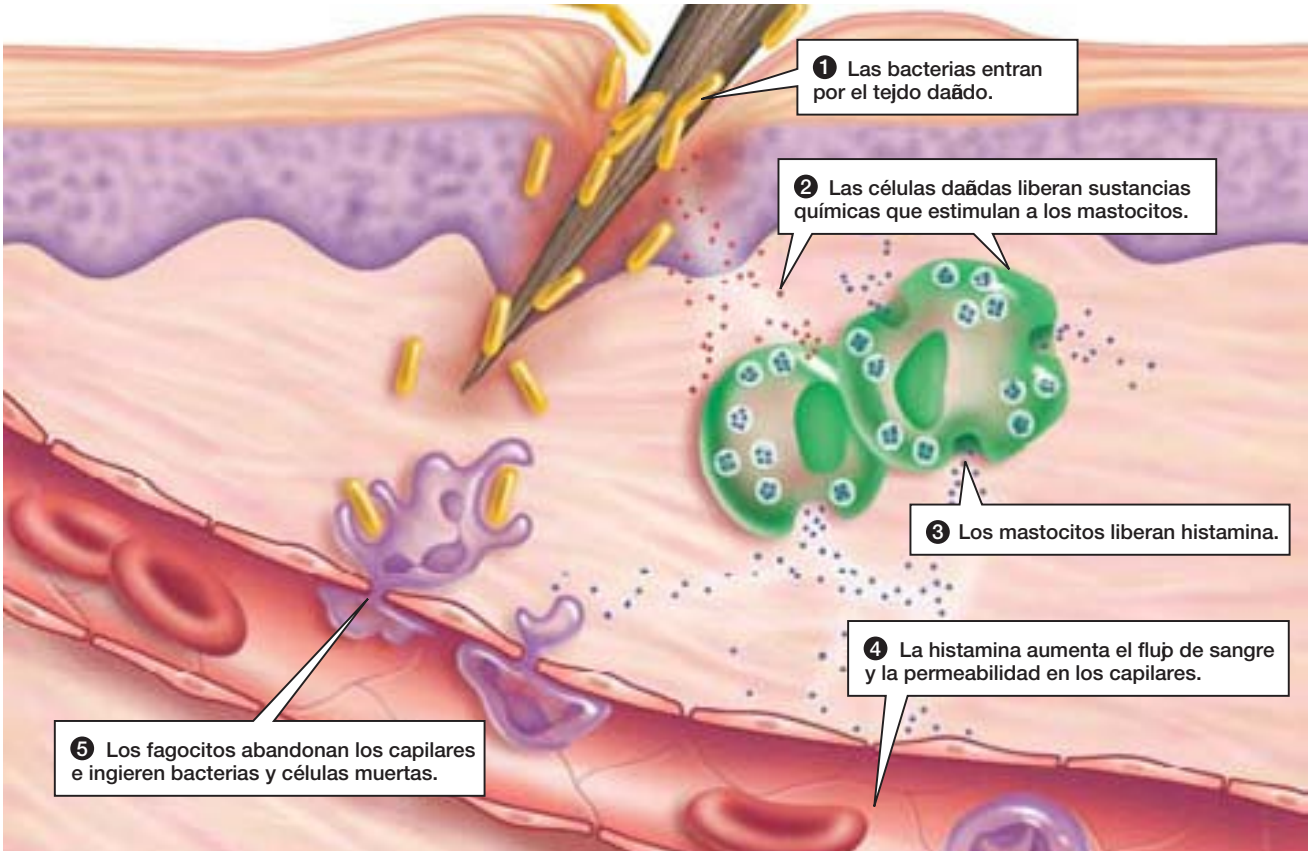

1 Las bacterias entran por el tejdo daãdo.
2 Las células daãdas liberan sustancias químicas que estimulan a los mastocitos.
3 Los mastocitos liberan histamina.
4 La histamina aumenta el flup de sangre y la permeabilidad en los capilares.
5 Los fagocitos abandonan los capilares e ingieren bacterias y células muertas.

FIGURA 36-5 La respuesta inflamatoria
PREGUNTA: ¿Por qué son los glóbulos blancos, y no los glóbulos rojos, los que abandonan los capilares?

lismo de las grasas, constricción de los vasos sanguíneos superficiales y conductas de conservación como temblar y meterse bajo las cobijas. Las citocinas también hacen que otras células reduzcan la concentración de hierro en la sangre.

La fiebre refuerza las defensas normales del cuerpo y también daña a los microbios invasores. En el caso de una infección bacteriana, la fiebre incrementa la actividad de los glóbulos blancos que atacan a las bacterias. Las células inmunitarias (de las que se hablará más adelante) se multiplican más rápidamente. Al mismo tiempo, la elevada temperatura del cuerpo obliga a muchas bacterias a reproducirse con mayor lentitud y a utilizar más hierro; así, la fiebre y la reducción en el hierro de la sangre se combinan para frenar la reproducción bacteriana.

La fiebre también ayuda a combatir las infecciones virales al incrementar la producción de la citocina antiviral *interferón*, que entonces viaja a otras células e incrementa su resistencia al ataque viral. La fiebre es un mecanismo de defensa, como se ilustra por un experimento en el que personas con infecciones virales recibieron tratamiento con aspirina (para reducir la fiebre) o un *placebo* (una sustancia inactiva que a los ojos de los sujetos pasa por un medicamento real, por lo que sirve como control en el experimento). Los sujetos que recibieron aspirina tenían muchos más virus en la nariz y la garganta —y, por tanto, estornudaban y tosían más virus— que los sujetos que recibieron el placebo. Este hallazgo apoya la hipótesis de que la fiebre ayuda a combatir las infecciones virales. Puesto que las fiebres son un signo de infección —y como algunas de ellas son peligrosas—, siempre hay que consultar a un profesional médico para tratarlas.

36.3 ¿QUÉ CARACTERÍSTICAS CLAVE TIENE LA RESPUESTA INMUNITARIA?

Las barreras externas, las células fagocíticas, las células asesinas naturales, la respuesta inflamatoria y la fiebre son defensas *no específicas*, que impiden o combaten las invasiones microbianas al cuerpo. Por desgracia, estas defensas no específicas están lejos de ser inexpugnables. Cuando fallan en su cometido, el cuerpo organiza una respuesta inmunitaria coordinada y sumamente específica dirigida en contra del organismo particular que colonizó con éxito el cuerpo. Esta respuesta implica a un ejército de glóbulos blancos especializados que secretan un conjunto de diferentes sustancias químicas y se comunican de formas complejas. La respuesta inmunitaria es posible gracias al **sistema inmunitario**, que consta de células y órganos distribuidos por todo el cuerpo. El sistema inmunitario incluye macrófagos y leucocitos (glóbulos blancos) especializados llamados **linfocitos**, los cuales participan en la respuesta inmunitaria. Comprende varias proteínas, como las citocinas y los anticuerpos secretados a la sangre por las células inmunitarias, así como *proteínas de complemento* (que se describirán más adelante) y que son secretadas por el hígado. El sistema inmunitario también incluye la médula ósea, donde se producen las células inmunitarias, así como las estructuras donde esas células residen, se diferencian, proliferan y atacan a los

invasores. Tales estructuras incluyen el timo (véase el capítulo 33), el bazo, los ganglios linfáticos y los vasos linfáticos (véase el capítulo 32). Aunque el sistema circulatorio no es parte "oficial" del sistema inmunitario, es importante en tanto que transporta a las células inmunitarias por todo el cuerpo.

El historiador griego Tucídides reconoció hace más de 2000 años las características fundamentales de la respuesta inmunitaria a las infecciones. Él observó que en ocasiones una persona contraía una enfermedad, se recuperaba y nunca volvía a contraer esa enfermedad en particular: la persona se había vuelto *inmune*. En la mayoría de los casos, la respuesta inmunitaria ataca a un tipo de microbio en particular, lo vence, y confiere protección futura contra ese microbio, pero no contra otros, a menos que estén estrechamente emparentados.

Supongamos que pasa lo peor y tu compañera de clase te contagia su gripe. El virus penetra todas las defensas no específicas y activa tu respuesta inmunitaria. Los macrófagos y los leucocitos especializados (glóbulos blancos), llamados linfocitos, participan en esta respuesta. Los linfocitos se distribuyen por todo el cuerpo en la sangre y la linfa, y muchos se reúnen en órganos específicos, particularmente en el timo, los ganglios linfáticos y el bazo (descritos en el capítulo 32).

La respuesta inmunitaria surge de interacciones entre los diversos tipos de linfocitos y las moléculas que producen. En la **tabla 36-1** se presenta una breve reseña de los principales tipos de células que participan tanto en las defensas no específicas como en las respuestas inmunitarias específicas. Los actores clave de la respuesta inmunitaria son dos tipos de linfocitos, llamados **células B** y **células T**. Al igual que todos los glóbulos blancos, las células B y T nacen de precursores linfocíticos de la médula ósea. Algunos de esos precursores linfocíticos se liberan al torrente sanguíneo y viajan al timo, donde terminan de diferenciarse y se convierten en células T (de *timo*). En contraste, las células B se diferencian en la médula ósea. Estos dos tipos de células desempeñan papeles muy distintos en la respuesta inmunitaria, pero en ambos casos siguen tres pasos fundamentales. Primero, las células del sistema inmunitario reconocen al invasor; segundo, lanzan un ataque; y, tercero, recuerdan al invasor para repeler infecciones futuras.

Tabla 36-1 Células de la respuesta inmunitaria

Mastocitos	Células de tejido conectivo que liberan histamina; importantes en la respuesta inflamatoria.
Neutrófilos	Glóbulos blancos que fagocitan a los microbios invasores.
Macrófagos	Glóbulos blancos que fagocitan a microbios invasores y presentan antígenos.
Células asesinas naturales	Glóbulos blancos que destruyen células infectadas o cancerosas.
Células B	Glóbulos blancos que producen anticuerpos.
Células plasmáticas	Descendientes de células B que secretan anticuerpos al torrente sanguíneo.
Células B de memoria	Descendientes de células B que confieren inmunidad futura contra invasiones del mismo antígeno.
Células T	Glóbulos blancos que regulan la respuesta inmunitaria o matan a ciertos tipos de células.
Células T citotóxicas	Descendientes de células T que destruyen células eucarióticas ajenas, células del cuerpo infectadas o cancerosas.
Células T auxiliares	Descendientes de células T que estimulan respuestas inmunitarias por parte de células B y células T citotóxicas.
Células T de memoria	Descendientes de células T que confieren inmunidad futura contra invasiones del mismo antígeno.

Las células del sistema inmunitario reconocen al invasor

Los invasores presentan antígenos característicos

Las células inmunitarias reconocen a las moléculas extrañas que son específicas del microbio invasor o toxina; estas moléculas sirven como **antígenos** ("*gene*radores de respuesta de *anti*cuerpos"). En general, sólo las moléculas grandes y complejas, como las proteínas, los polisacáridos y las glucoproteínas, pueden actuar como antígenos. Los antígenos pueden estar en la superficie de los microbios invasores o las células cancerígenas, y los antígenos virales se incorporan en las membranas plasmáticas de las células corporales infectadas. Los antígenos virales o bacteriales también están expuestos en las membranas plasmáticas de los macrófagos que los fagocitan. Otros tipos de antígenos quedan disueltos en la sangre o en el líquido intersticial; por ejemplo, el veneno de las serpientes y las toxinas liberadas por las bacterias son antígenos disueltos.

Los anticuerpos y los receptores de células T reconocen y se unen a los antígenos extraños

Las células del sistema inmunitario generan dos tipos de proteínas que reconocen antígenos específicos, se unen con ellos y ayudan a destruirlos: los **anticuerpos**, producidos por las células B y sus descendientes (células plasmáticas y células B de memoria), y los **receptores de células T**, producidos por las células T.

Los anticuerpos son proteínas con forma de Y constituidas por dos pares de cadenas peptídicas: un par de cadenas grandes (pesadas) idénticas y un par de cadenas pequeñas (ligeras) idénticas (**FIGURA 36-6**). Ambos tipos de cadenas tienen una **región constante**, que es similar en todos los anticuerpos del mismo tipo, y una **región variable**, que difiere entre anticuerpos individuales. La combinación de cadenas pesadas y ligeras produce un anticuerpo con dos partes funcionales: los "brazos" y el "tronco" de la Y. Las regiones variables en las puntas de los brazos del anticuerpo forman sitios de unión cuyas formas y cargas eléctricas las hacen específicas para un solo tipo, o unos cuantos tipos, de antígenos.

Hay cinco clases de anticuerpos, distinguidos por ciertas variaciones en la región del tronco. Los anticuerpos en las células B las activan cuando éstas se unen a un antígeno, lo que provoca su división y produce células plasmáticas que secretan anticuerpos (véase la figura 36-9). Los anticuerpos secretados se unen a los antígenos y ayudan a desecharlos de varias maneras. Algunos hacen a los antígenos más atractivos a los fagocitos o agrupan a los organismos patógenos para que sean fácilmente reconocibles y puedan ser fagocitados (**FIGURA 36-7a**). Algunos anticuerpos interfieren con estructuras que permiten a las bacterias adherirse a sus células huésped o bloquean los sitios en los virus que promueven la entrada de éstos a sus células huésped. Otros anticuerpos se unen a toxinas bacterianas y las vuelven inofensivas (**FIGURA 36-7b**). Los anticuerpos también activan las proteínas de la sangre del *sistema de complemento* (que se describirá más adelante), las cuales pueden destruir los organismos patógenos. Un tipo de

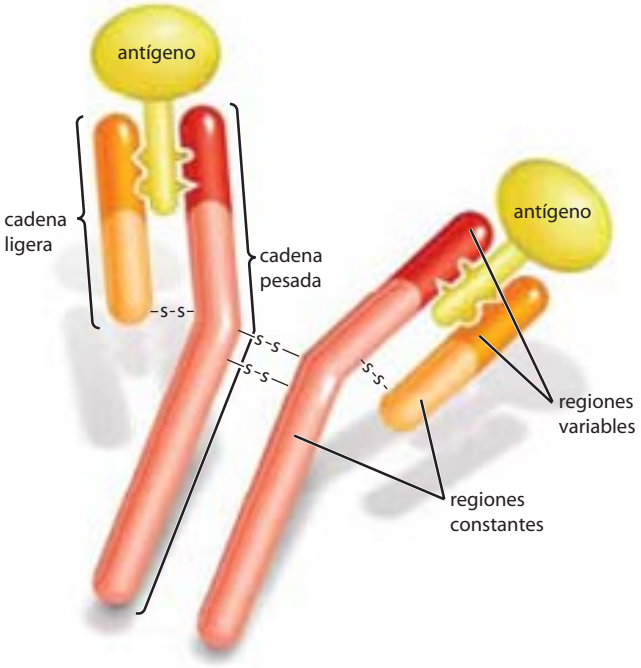


FIGURA 36-6 Estructura de los anticuerpos
Los anticuerpos son proteínas formadas por dos pares de cadenas peptídicas (ligeras y pesadas) dispuestas como la letra Y. Las regiones constantes de ambas cadenas constituyen el tronco de la Y; las regiones variables de las dos cadenas forman un sitio de unión específico en el extremo de cada brazo de la Y. Los diferentes anticuerpos tienen regiones variables distintas y forman sitios de unión únicos. PREGUNTA: ¿Por qué las moléculas de los anticuerpos tienen regiones constantes y variables?

anticuerpos es capaz de cruzar la placenta y brindar inmunidad al feto en desarrollo y otra clase es secretada en la leche materna. Ambos ayudan al recién nacido, cuyo sistema inmunitario no está desarrollado por completo, a resistir los ataques del mundo exterior.

Los receptores de células T presentan diferencias y similitudes respecto a los anticuerpos. A diferencia de muchos anticuerpos, los receptores de las células T permanecen unidos a la superficie de estas células. Constan de dos cadenas peptídicas, aproximadamente del mismo tamaño. Al igual que los brazos de un anticuerpo, los extremos de las dos cadenas forman sitios de unión muy específicos para un antígeno. Los receptores de células T provocan una respuesta por parte de estas células sólo cuando encuentran antígenos montados en las membranas de células cancerosas o infectadas, o en las membranas de macrófagos que han ingerido a los microbios invasores. A diferencia de los anticuerpos, los receptores de células T no contribuyen directamente a desactivar a los organismos patógenos. En vez de ello, alteran la actividad de las células T a las que están unidos, como se describirá más adelante.

Las células del sistema inmunitario pueden reconocer millones de tipos de moléculas y producir respuestas específicas a ellas

A lo largo de nuestra vida, nuestro cuerpo será atacado por una multitud de invasores diversos. Nuestros compañeros de clase estornudarán y llenarán el aire que respiramos de virus de resfriado y de gripe. Nuestros alimentos pueden albergar

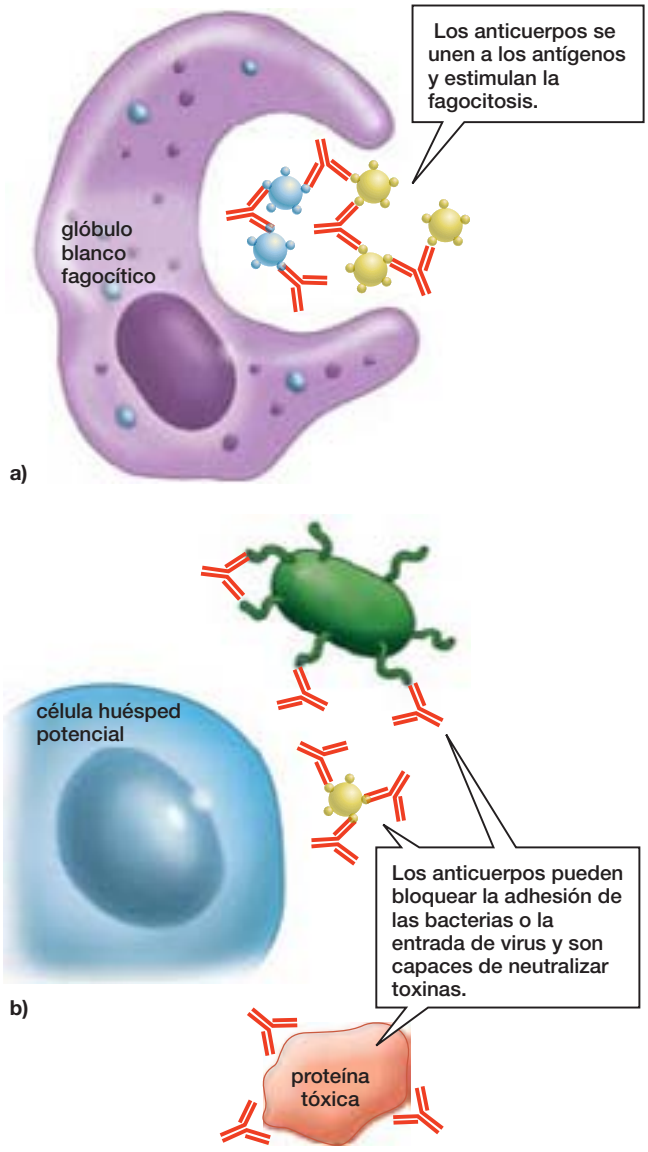

Los anticuerpos se unen a los antígenos y estimulan la fagocitosis.
glóbulo blanco fagocítico
a)
célula huésped potencial
Los anticuerpos pueden bloquear la adhesión de las bacterias o la entrada de virus y son capaces de neutralizar toxinas.
b)
proteína tóxica

FIGURA 36-7 Algunas funciones de los anticuerpos

una población bacteriana o quizá nos pique una garrapata infectada con la bacteria de la enfermedad de Lyme. Es imposible escapar a los ubicuos y persistentes ataques de los invasores. Por fortuna, nuestro sistema inmunitario reconoce y responde a prácticamente todos los millones de antígenos potencialmente dañinos con los que podemos toparnos, porque sus células producen millones de anticuerpos y distintos receptores de células T, cada uno de los cuales puede unirse a un antígeno diferente.

Los mecanismos por los que las células del sistema inmunitario reconocen a los antígenos son complejos y fascinantes. Después de todo, los anticuerpos y receptores de células T son proteínas, así que su estructura está codificada en genes. Podríamos pensar que, para reconocer a millones de antígenos distintos, cada persona necesitaría tener millones de genes distintos con el fin de sintetizar anticuerpos y receptores de células T. Sin embargo, el genoma humano entero contiene sólo unos 21,000 genes. Esto significa que un número relativamente pequeño de genes codifican las instrucciones para sintetizar millones de anticuerpos y receptores de células T. ¿Cómo ocurre esto?

Los anticuerpos y receptores de células T se constituyen a partir de fragmentos

No existen genes para las moléculas enteras de anticuerpos. La clave para producir números enormes de anticuerpos a partir de un número mucho menor de genes es ensamblar los anticuerpos a partir de piezas que se combinan en formas aleatorias. El genoma de los seres humanos y de otros vertebrados incluye genes que codifican muchas versiones diferentes de las regiones del anticuerpo que pueden unirse en millones de combinaciones diferentes. Al desarrollarse cada célula B individual, sólo conserva unos cuantos genes codificadores de fragmentos, escogidos al azar (que incluyen cadenas pesadas y ligeras, así como regiones constantes y variables); los demás se obtienen del DNA conforme la célula B madura, como se ilustra en la FIGURA 36-8. Por lo tanto, cada célula B produce un solo tipo de anticuerpo, determinado por la recombinación aleatoria de genes de región variable y constante, el cual es diferente del anticuerpo producido por otras células B (excepto por sus propias células hijas). La selección aleatoria de genes codificadores de fragmentos de anticuerpo, de entre una gran cantidad de opciones, produce un gran número de posibles combinaciones distintas. Esto puede entenderse más fácilmente si analizamos la formación de genes de anticuerpos en términos de dos mazos de naipes, cada uno con cientos de cartas. Cada célula B recibe una "mano" que contiene dos genes de región variable: uno elegido al azar del "mazo de cadena ligera y región variable" y otro del "mazo de cadena pesada y región variable". Como cada mazo contiene cientos de genes, habrá millones de combinaciones.

El sistema inmunitario no diseña anticuerpos ni receptores de células T expresamente para unirse con antígenos invasores

El resultado final de esta recombinación de genes es que cada célula B produce sus propios anticuerpos. El cuerpo humano contiene un "ejército" de quizá 100 millones de anticuerpos distintos (y un número aún mayor de receptores de células T), por lo que los antígenos casi siempre encuentran anticuerpos o receptores capaces de unirse a ellos. Es importante darse cuenta de que el sistema inmunitario no "diseña" anticuerpos ni receptores de células T en los que encajen los antígenos invasores, tal como un sastre podría diseñar ropa a la medida para un cliente. Más bien, el sistema inmunitario sintetiza al azar millones de anticuerpos y receptores distintos. Al igual que la ropa que se vende en una tienda departamental, el surtido de anticuerpos y receptores simplemente está ahí, esperando. En nuestra analogía con la ropa, si hay suficientes percheros con ropa para escoger, todos encontraremos algo que nos quede bien. La unión de un antígeno con un anticuerpo origina cambios en las células B, los cuales normalmente dan pie a la destrucción de los microbios que llevan el antígeno. Examinaremos los pormenores de esos cambios dentro de un momento.

El sistema inmunitario distingue lo "propio de lo "ajeno"

¿Por qué nuestro sistema inmunitario no destruye nuestras propias células? Las superficies de nuestras propias células corporales llevan proteínas y polisacáridos grandes, al igual que las llevan los microbios. Algunas de esas proteínas, llamadas en conjunto **complejo mayor de histocompatibilidad** (*major histocompatibility complex*, MHC), son únicas para cada individuo (con excepción de los gemelos idénticos, que tienen los mismos genes y, por lo tanto, las mismas proteínas de MHC). ¿Por qué estos antígenos de "identidad" no movilizan al sistema inmunitario propio? La clave parece ser la presencia continua de los antígenos del cuerpo durante la maduración de las células inmunitarias. Algunas células inmunitarias que se están diferenciando producen anticuerpos o receptores de células T capaces de unirse a las proteínas y polisacáridos del propio cuerpo, tratándolos como antígenos. Sin embargo, estas células inmunitarias inmaduras y desorientadas se destruyen rápidamente. Al destruir estas células infractoras antes de que maduren, el sistema inmunitario distingue lo "propio" de lo "ajeno" y conserva sólo las células inmunitarias que no atacan a las moléculas propias del cuerpo.

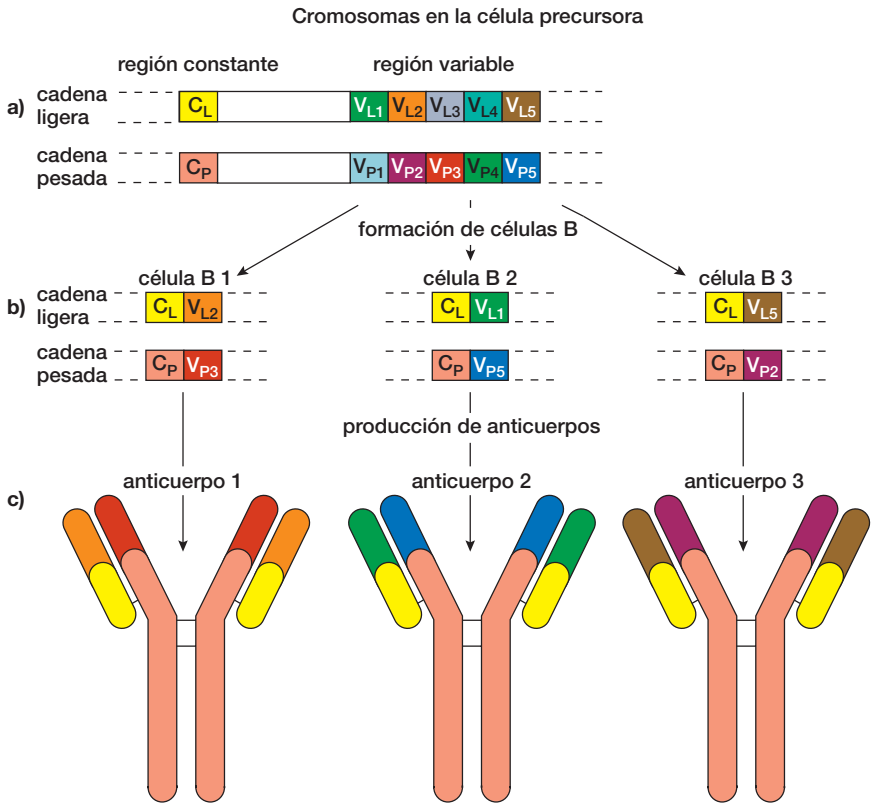


FIGURA 36-8 La recombinación produce genes de anticuerpos

Cada célula precursora del sistema inmunitario contiene al menos un gen para las regiones constantes (C) de las cadenas ligera (C_L) y pesada (C_P) de los anticuerpos y muchos genes para las regiones variables (V_{L1-5} y V_{P1-5}).

Durante el desarrollo de cada célula B, estos genes se recombinan para colocar uno de los genes de región variable junto a un gen de región constante. Así, para cada cadena, cada célula B genera un "gen de anticuerpo recombinado" que difiere de los genes de anticuerpo recombinados generados por otras células B. ***c)***

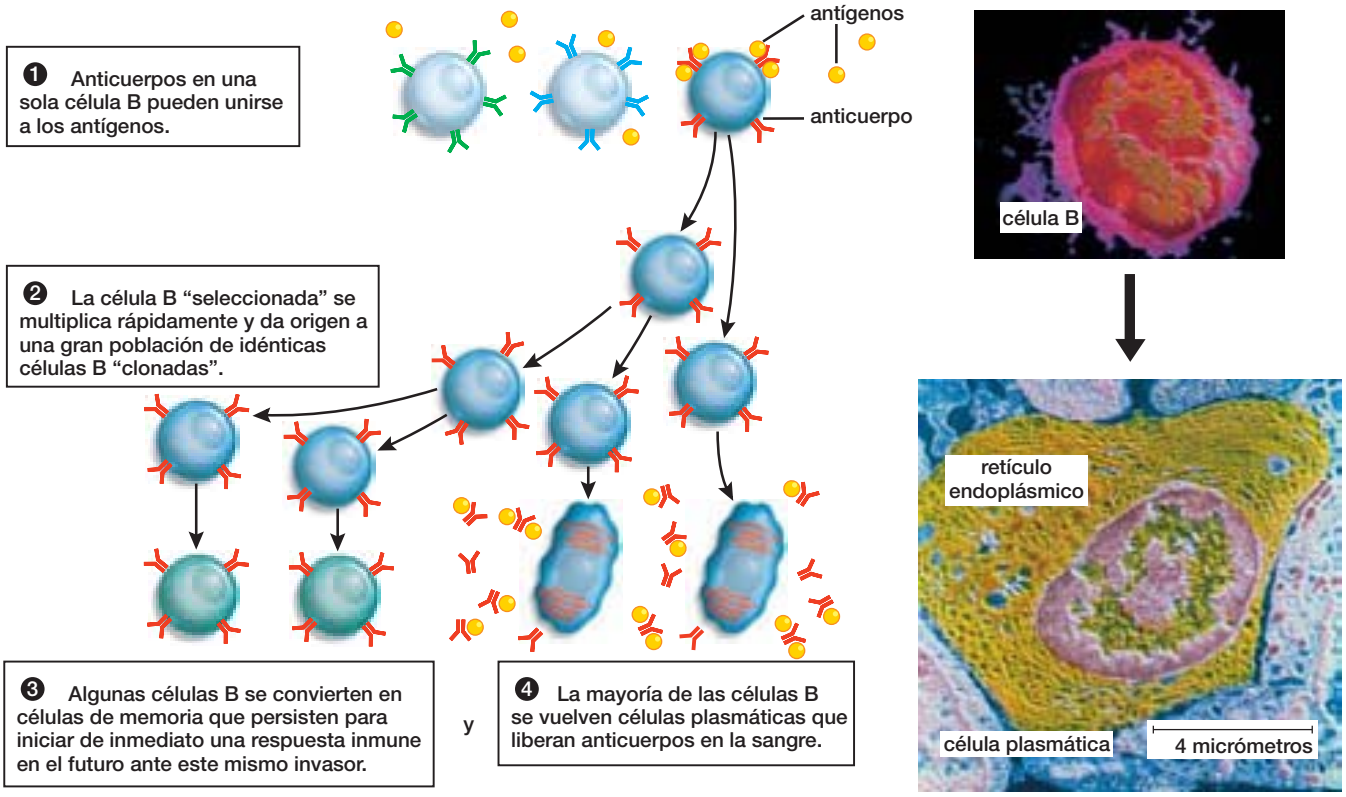

❶ Anticuerpos en una sola célula B pueden unirse a los antígenos.
antígenos
anticuerpo
célula B
❷ La célula B "seleccionada" se multiplica rápidamente y da origen a una gran población de idénticas células B "clonadas".
retículo endoplásmico
célula plasmática
4 micrómetros
❸ Algunas células B se convierten en células de memoria que persisten para iniciar de inmediato una respuesta inmune en el futuro ante este mismo invasor.
y
❹ La mayoría de las células B se vuelven células plasmáticas que liberan anticuerpos en la sangre.

FIGURA 36-9 Selección clonal entre células B y producción de células plasmáticas
(**izquierda**) Los antígenos "seleccionan" una célula B al unirse a su anticuerpo específico haciéndola que se divida y se diferencie en células plasmáticas y células B de memoria. (**derecha**) Una célula B antes (*arriba*) y después (*abajo*) de convertirse en una célula plasmática. La célula plasmática es mucho más grande y está empacada con retículo endoplásmico rugoso, que sintetiza anticuerpos para ser liberados en el plasma.

Como las proteínas MHC de un individuo son únicas, actúan como antígenos extraños en los cuerpos de otras personas. Por eso es que en ocasiones los órganos trasplantados sufren rechazo. Los médicos deben encontrar un donador cuyas proteínas MHC sean tan similares como sea posible a las del receptor, pero incluso cuando hay compatibilidad de tejidos, los pacientes que han recibido trasplante también deben tomar medicamentos para suprimir la acción del sistema inmunitario. Sin estos medicamentos, el sistema inmunitario del receptor atacaría las proteínas MHC extrañas en las células del donador, destruyendo el tejido trasplantado.

Las células del sistema inmunitario lanzan un ataque

Una vez que nuestro cuerpo ha sido invadido, digamos por un virus de gripe, nuestro sistema inmunitario organiza dos tipos de ataque: inmunidad humoral e inmunidad mediada por células. Las células B y los anticuerpos que secretan al torrente sanguíneo proveen la **inmunidad humoral**, la cual consiste en atacar patógenos antes de que puedan entrar a las células del cuerpo. Un tipo de células T, llamadas *células citotóxicas T*, proporcionan **inmunidad mediada por células**, pues atacan a células cancerosas o infectadas, matando tanto a las mismas células como a los patógenos dentro de ellas. Estos dos tipos de respuestas inmunitarias requieren una comunicación considerable entre los distintos tipos de células. Tanto la inmunidad humoral como la mediada por células son estimuladas por **células auxiliares T**. Los receptores de las células auxiliares T se unen a antígenos microbianos que están expuestos en las membranas plasmáticas de los macrófagos que fagocitaron a los invasores. Al unirse a un antígeno, las células auxiliares T proliferan y liberan una variedad de citocinas, las cuales estimulan la división celular y el desarrollo entre las células B y las células T citotóxicas que son específicas para ese antígeno (véase más adelante la figura 36-11). Es posible que ocurra una pequeña respuesta inmunitaria, ya sea del tipo humoral o mediada por células, sin el estímulo químico de las células auxiliares T. Por eso el SIDA, que destruye las células auxiliares T, es una enfermedad mortal. Aunque la inmunidad humoral y la mediada por células no son totalmente independientes, aquí las examinaremos por separado para facilitar su comprensión.

La inmunidad humoral se debe a anticuerpos disueltos en la sangre

Cada célula B lleva un tipo específico de anticuerpo en su superficie. Cuando se presenta una infección, los anticuerpos de unas cuantas células B pueden unirse a los antígenos del invasor. La unión antígeno-anticuerpo hace que estas células B se dividan rápidamente. El proceso se denomina **selección clonal** porque la población resultante de células consta de "clones" (porque son genéticamente idénticas a las células B progenitoras) que se "seleccionaron" para multiplicarse, gracias a la presencia de antígenos invasores específicos (**FIGURA 36-9**). Las células hijas se diferencian en dos tipos: **células B de memoria** y **células plasmáticas**. Las primeras no liberan anticuerpos, pero sí desempeñan un papel importante en la inmunidad futura a la enfermedad particular que estimuló su producción (como veremos más adelante). Las células plasmáticas crecen y se llenan de retículo endoplásmico, en el que se sintetizan enormes cantidades de anticuerpos específicos (figura 36-9). Estos anticuerpos son liberados al torrente sanguíneo (de ahí

el término "inmunidad humoral"; para los antiguos griegos, la sangre era uno de los cuatro "humores" o líquidos corporales).

Puesto que los anticuerpos circulan en el torrente sanguíneo, la inmunidad humoral sólo puede defender contra organismos patógenos que están en la sangre o en el líquido intersticial. Así, las bacterias, las toxinas bacterianas y algunos hongos y protistas son vulnerables a la respuesta inmunitaria humoral. Los microbios patógenos como los virus están a salvo de los ataques de los anticuerpos mientras se encuentren en el interior de una célula del cuerpo. Los anticuerpos sólo pueden atacar a los virus cuando éstos acaban de ingresar al cuerpo, o bien, una vez que los virus han terminado de reproducirse en una célula huésped, la han reventado y han salido a los líquidos del cuerpo.

La inmunidad humoral destruye las sustancias químicas extrañas o microbios de diferentes maneras, en función de la clase del anticuerpo. Como se mencionó antes, los anticuerpos en circulación pueden inactivar a los organismos patógenos uniéndose a ellos o haciendo que se aglutinen. Los patógenos unidos a los anticuerpos son más fáciles de fagocitar para los macrófagos. Un tipo de anticuerpos unidos a los antígenos (particularmente a antígenos bacteriales) inicia una serie compleja de reacciones entre un grupo de proteínas de la sangre que constituyen el **sistema de complemento**. Las bacterias junto con los anticuerpos son exterminados cuando estas reacciones producen proteínas que forman agujeros en la membrana bacterial. Algunas proteínas de complemento ayudan a los glóbulos blancos fagocíticos a engullir a los invasores.

Para combatir la infección viral que contrajiste a partir del estornudo de tu compañera de clase, también necesitas la ayuda de respuestas inmunitarias mediadas por células. Tanto la inmunidad humoral como la mediada por células preparan una respuesta inmunitaria que bien puede tardar dos semanas en volverse completamente activa contra un organismo infeccioso que no resulte familiar.

Las células T producen la inmunidad mediada por células

¿Cómo puede el sistema inmunitario buscar las células del propio cuerpo que son cancerosas o que albergan virus? ¿Por qué a veces se rechazan los órganos trasplantados? Éstos son los resultados de la inmunidad mediada por células. Tres tipos de células T contribuyen a la inmunidad mediada por células: *células T auxiliares, células T citotóxicas* y *células T de memoria.*

Recordemos que las células T auxiliares responden a los antígenos en las superficies de los macrófagos, proliferan y producen citocinas que estimulan la división y diferenciación celular. Algunas de estas células T se convierten en **células T citotóxicas**. Los receptores en las membranas de las células T citotóxicas se unen a los antígenos en la superficie de las células cancerosas o infectadas (**FIGURA 36-10**). Luego las células T citotóxicas liberan proteínas (similares a aquellas producidas por las células asesinas naturales) que forman grandes poros en las membranas de las células blanco y enzimas que entran por estos hoyos y provocan que las células anormales se revienten. Después de que la infección termina, algunas células T se convierten en **células T de memoria**, las cuales, al igual que las células B de memoria, ayudan a proteger al cuerpo contra futuras infecciones. La **FIGURA 36-11**

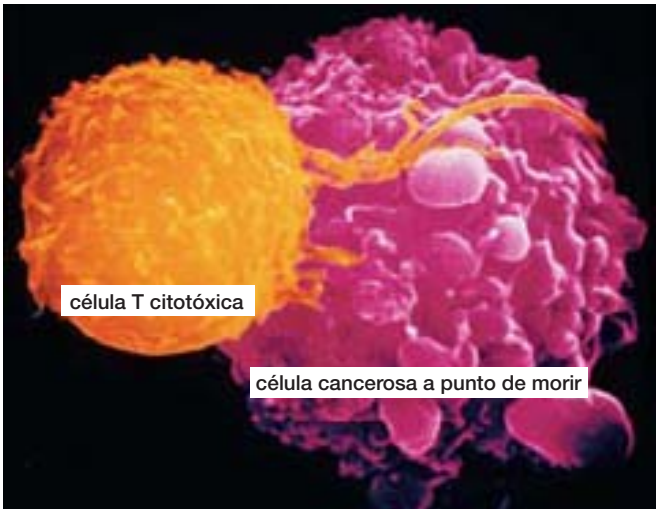


FIGURA 36-10 Inmunidad mediada por células en acción
Una célula T citotóxica ataca a una célula cancerosa (en rojo) en esta micrografía por barrido electrónico. PREGUNTA: El cáncer se forma a partir de células del cuerpo. Entonces, ¿cómo logra el sistema inmunitario atacar a las células cancerosas?

Las células del sistema inmunitario recuerdan sus victorias anteriores

Después de recuperarnos de una enfermedad, conservaremos la inmunidad a esa cepa específica de microbios por muchos años, quizá durante toda la vida. Mantener la inmunidad es la función de las células de memoria. Las células plasmáticas y las células T citotóxicas combaten directamente a los organismos patógenos, pero normalmente viven sólo unos cuantos días. Sin embargo, tanto las células B (que producen células plasmáticas) como las células T citotóxicas dejan tras de sí pequeñas poblaciones de células de memoria que sobreviven durante muchos años. Si el cuerpo vuelve a ser invadido por microbios contra los cuales el sistema inmunitario ya organizó una respuesta, las células de memoria apropiadas reconocerán a los invasores de inmediato. Estas células de memoria se multiplicarán rápidamente para producir enormes poblaciones de células plasmáticas (a partir de las células B de memoria) y células T citotóxicas (a partir de las células T de memoria). Puesto que hay tantas células de memoria listas para responder, el cuerpo puede repeler un segundo ataque antes de que éste logre afianzarse (**FIGURA 36-12**). ¿Por qué, entonces, seguimos padeciendo resfriados y gripes? El problema, como se describe en la sección "Guardián de la salud: El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar?", es que los virus que causan los resfriados y gripes cambian de un año a otro. Por desgracia, existen tantos virus del resfriado que encontraremos diferentes versiones de éstos a lo largo de nuestra vida.

36.4 ¿CÓMO LOGRA LA ATENCIÓN MÉDICA MEJORAR LA RESPUESTA INMUNITARIA?

Las vacunas estimulan el desarrollo de células de memoria

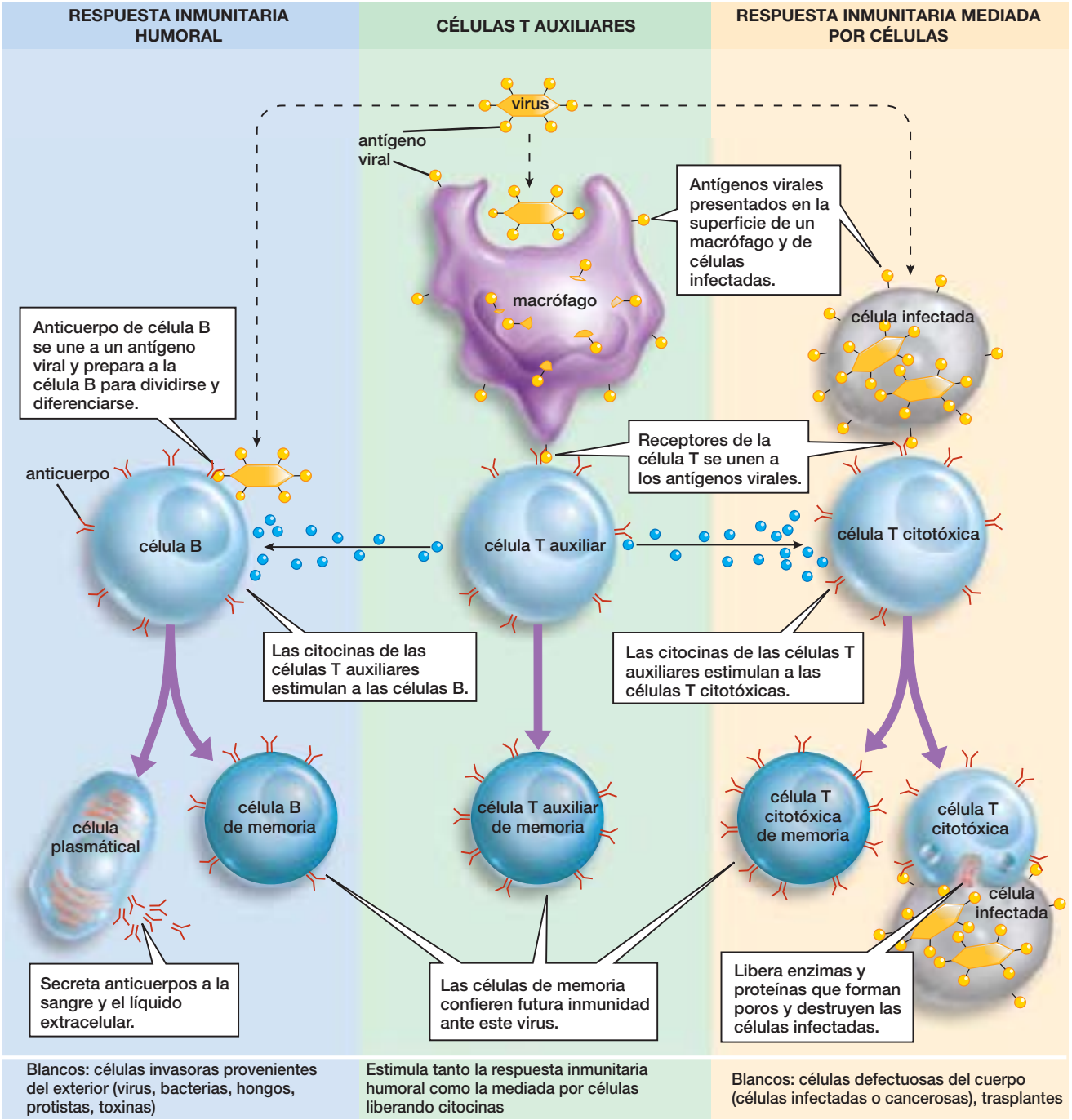

RESPUESTA INMUNITARIA HUMORAL
CÉLULAS T AUXILIARES
RESPUESTA INMUNITARIA MEDIADA POR CÉLULAS
virus
antígeno viral
Antígenos virales presentados en la superficie de un macrófago y de células infectadas.
macrófago
célula infectada
Anticuerpo de célula B se une a un antígeno viral y prepara a la célula B para dividirse y diferenciarse.
anticuerpo
Receptores de la célula T se unen a los antígenos virales.
célula B
célula T auxiliar
célula T citotóxica
Las citocinas de las células T auxiliares estimulan a las células B.
Las citocinas de las células T auxiliares estimulan a las células T citotóxicas.
célula plasmática
célula B de memoria
célula T auxiliar de memoria
célula T citotóxica de memoria
célula T citotóxica
célula infectada
Secreta anticuerpos a la sangre y el líquido extracelular.
Las células de memoria confieren futura inmunidad ante este virus.
Libera enzimas y proteínas que forman poros y destruyen las células infectadas.
Blancos: células invasoras provenientes del exterior (virus, bacterias, hongos, protistas, toxinas)
Estimula tanto la respuesta inmunitaria humoral como la mediada por células liberando citocinas
Blancos: células defectuosas del cuerpo (células infectadas o cancerosas), trasplantes

FIGURA 36-11 Resumen de las respuestas inmunitarias humoral y mediada por células

específico después de que el sujeto en cuestión tuvo esa enfermedad. ¿No sería formidable adquirir ese estado de "preparación inmunitaria" sin tener que sufrir la enfermedad? Las *vacunas* logran este cometido preparando al cuerpo con antígenos a partir del organismo causante de la enfermedad. Estos atajos para la inmunidad se trazan de diferentes maneras:

- Los organismos causantes de enfermedades son exterminados o debilitados, de manera que son incapaces de causar la enfermedad, pero conservan en su superficie las moléculas de antígenos. La mayoría de las vacunas contra la gripe se fabrican de esta forma.
- Las moléculas antigénicas específicas se purifican a partir del organismo causante de la enfermedad.
- Se utilizan técnicas de ingeniería genética para introducir el material genético que codifica un antígeno específico a partir de un microorganismo patógeno en bacterias o levaduras inocuas, las cuales crecen en grandes cantidades y expresan el antígeno del organismo causante de la enfermedad. El antígeno puede purificarse y utilizarse como vacuna.
- Un organismo patógeno emparentado que no provoca síntomas (o si acaso, síntomas muy leves) se utiliza para estimular una respuesta inmunitaria a un patógeno mucho más peligroso con el cual comparte moléculas antigénicas. Edgard Jenner empleó esta técnica para elaborar sus primeras vacunas sistemáticas contra la viruela, utilizando virus que provocaban vaccinia o viruela vacuna, una enfermedad del ganado vacuno mucho menos mortal, como se

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA — El descubrimiento de las vacunas

La humanidad ha temido a la viruela desde la antigüedad. En el pasado esta enfermedad sumamente contagiosa provocaba la muerte del 30 por ciento de sus víctimas y dejaba a muchas otras desfiguradas con profundas cicatrices en la piel. Las cicatrices eran causadas por las erupciones llenas de pus antes de formar costras. Documentos de la India fechados en tiempos tan antiguos como el año 1100 a. de C. describen que la gente se protegía de la viruela exponiendo a sujetos saludables al pus de las erupciones de las víctimas de viruela. Aunque algunos de ellos morían, muchos receptores de esta primitiva forma de vacunación desarrollaban sólo síntomas leves y eran capaces de resistir la exposición posterior a la enfermedad. Para el siglo XIX la gente de Inglaterra había observado que las víctimas de vaccinia o viruela vacuna (una enfermedad relacionada pero mucho menos grave) no enfermaban de viruela. En 1796 el cirujano británico y biólogo experimental Edgard Jenner obtuvo líquido de las erupciones de viruela vacuna en las manos de una mujer que ordeñaba vacas e inoculó a un niño de ocho años con este material cargado de bacterias (**FIGURA E36-1**). Unos meses después, en un experimento atrevido y arriesgado, Jenner inoculó al niño con material de una lesión de viruela humana. Por fortuna, el niño siguió sano. Después de repetir estos resultados, Jenner publicó sus hallazgos en 1798. Esta forma inicial de vacunación se adoptó rápidamente en Europa y finalmente en todo el mundo, lo que redujo drásticamente el número de muertes provocadas por viruela.

De manera sorprendente, casi pasó un siglo antes de que el procedimiento de vacunación se aplicara a otras enfermedades infecciosas. Louis Pasteur fue quien logró esto a finales del siglo XIX, por lo que se le considera como uno de los científicos más distinguidos en la historia y como uno de los primeros en reconocer el papel de los microbios como causantes de enfermedades. Como sucede a menudo en los experimentos científicos, los sucesos producto del azar, en combinación con cuidadosas observaciones, guiaron el trabajo inicial de Pasteur en torno a las vacunas. Pasteur logró hacer crecer la bacteria causante del cólera de las aves en un medio de cultivo, y descubrió que causaba la enfermedad mortal cuando se inyectaba en pollos. La historia cuenta que cuando Pasteur inyectó a los pollos con la bacteria de un viejo cultivo que se había dejado en el laboratorio durante las vacaciones de verano, los pollos enfermaron, pero sobrevivieron. Luego, hizo crecer un cultivo fresco y necesitó pollos para inocular, así que utilizó algunos de los que sobrevivieron al experimento anterior. Para su sorpresa, los pollos siguieron saludables. De esta forma, Pasteur planteó la hipótesis de que las bacterias debilitadas podían proteger contra posteriores infecciones provocadas por bacterias saludables, y acuñó el término "vacuna" (que proviene de la palabra latina "vaca") en memoria del trabajo pionero de Jenner con la viruela vacuna. Pasteur aplicó después la técnica al ántrax en las ovejas y luego a la rabia, lo que le permitió salvar a un niño que había sido mordido varias veces por un perro rabioso. Aunque Pasteur no tenía conocimiento del sistema inmunitario, sus experimentos marcaron el comienzo de la ciencia de la inmunología. Como el mismo Pasteur afirmó: "La casualidad favorece a las mentes preparadas". Este conocimiento es tan relevante para la investigación científica como lo fue hace un siglo.

FIGURA E36-1 Jenner expone a un niño a la viruela que ataca al ganado vacuno como una forma de vacunación contra la viruela humana

describe en la sección "Investigación científica: El descubrimiento de las vacunas".

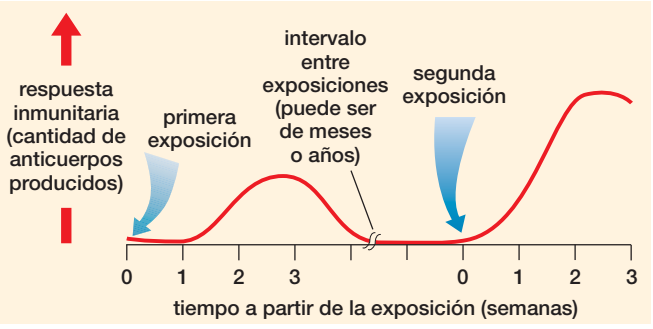


FIGURA 36-12 Células de memoria refuerzan la respuesta inmunitaria

El sistema inmunitario responde de manera lenta y no muy intensa a la primera exposición a un organismo patógeno, pues las células B y T deben seleccionarse y multiplicarse. Una segunda exposición activa las células de memoria que se formaron durante la primera respuesta, por lo que la segunda respuesta es más rápida e intensa.

En cada uno de estos casos, una exposición posterior al antígeno hace que las células de memoria —que llevan anticuerpos específicos para esta enfermedad— entren en acción, como si el sujeto hubiera contraído la enfermedad. Al proliferar más rápidamente que la primera vez, las células inmunitarias destruyen los organismos patógenos antes de que produzcan síntomas (véase la figura 36-12).

En la actualidad, muchas enfermedades —incluidas poliomielitis, difteria, fiebre tifoidea, paperas y sarampión— pueden controlarse mediante la **vacunación**. La viruela, la más mortal de todas ellas, se erradicó por completo en 1980 gracias a los programas de vacunación masiva patrocinados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Ahora sólo existen dos lugares donde se conservan los virus de la viruela de manera legal en almacenes fríos, contra la remota posibilidad de que "bioterroristas" posean lotes de virus de viruela, razón por la que se necesitarían más vacunas en el futuro.

Los antibióticos frenan la reproducción microbiana

Cualquier infección desata una carrera entre los microbios invasores y la respuesta inmunitaria. Si la infección inicial es ma-

siva o si los microbios producen subproductos particularmente tóxicos, las defensas no específicas podrían traspasarse y la respuesta inmunitaria podría llegar demasiado tarde. Además, algunos organismos patógenos han desarrollado ingeniosas defensas que les ayudan a evadir al sistema inmunitario. Por ejemplo, el parásito de la malaria pasa por tres etapas de su complejo ciclo de vida dentro de los humanos, pero cada etapa expone diferentes antígenos por muy poco tiempo para que el sistema inmunitario realice un ataque efectivo.

Los *antibióticos* son medicamentos que retardan el crecimiento y la multiplicación de muchos organismos patógenos, entre ellos, bacterias, hongos y protistas (pero no de los virus). Aunque los antibióticos por lo regular no destruyen a todos y cada uno de los microbios, dan al sistema inmunitario el tiempo suficiente para terminar la tarea. Sin embargo, un problema de los antibióticos es que son potentes agentes de selección natural (véase el capítulo 15). De vez en cuando aparecen microbios mutantes que son resistentes al antibiótico y transmiten a su progenie el gen o los genes de su resistencia. El resultado es que los mutantes resistentes proliferan, mientras que los microbios susceptibles se extinguen. Tarde o temprano, muchos antibióticos pierden su eficacia para tratar enfermedades, y los investigadores médicos trabajan continuamente para desarrollar otros nuevos.

Hasta hace muy poco, casi nada podía hacerse respecto a las infecciones virales, más allá de tratar los síntomas y abrigar la esperanza de que el sistema inmunitario saliera victorioso. En la actualidad se dispone de fármacos que atacan a los virus en diferentes etapas de su ciclo infeccioso, lo que incluye su adhesión a la célula huésped, la duplicación de partes virales utilizando la maquinaria celular del huésped, el ensamblaje de los virus dentro de la célula huésped, y la liberación de incontables virus en el líquido intersticial, lo que les permite infectar nuevas células. Los medicamentos antivirales no se prescriben para la mayoría de los virus, pero se utilizan para tratar el VIH, graves infecciones provocadas por el virus del herpes y, en algunos casos, el virus de la gripe (véase "Guardián de la salud: El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar?").

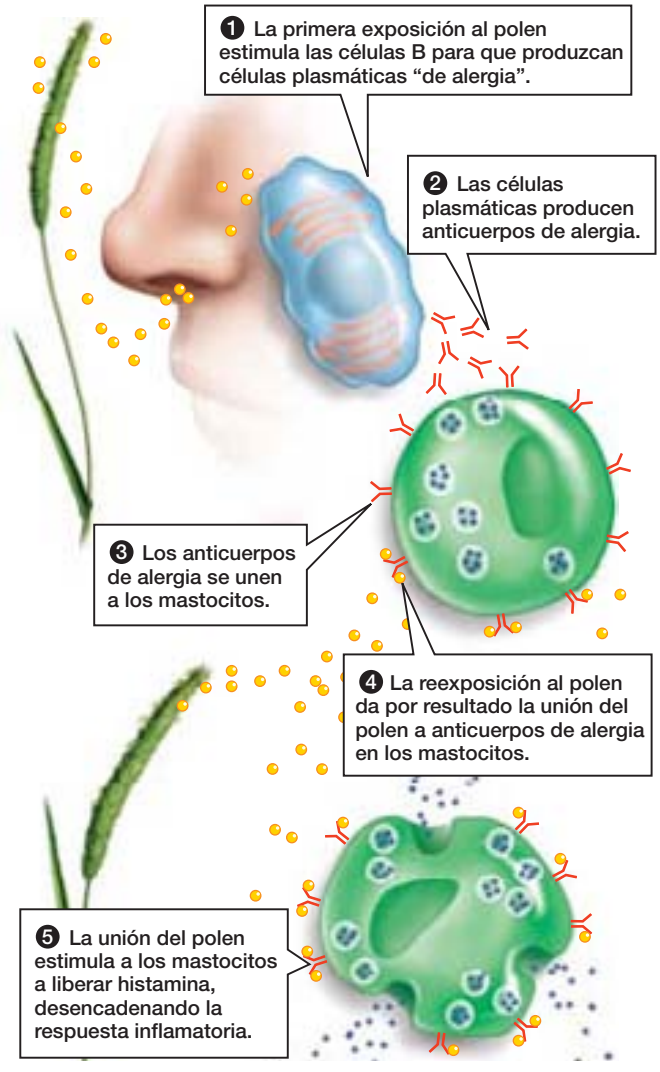
36.5 ¿QUÉ SUCEDE CUANDO EL SISTEMA INMUNITARIO NO FUNCIONA CORRECTAMENTE?

Las alergias son respuestas inmunitarias mal dirigidas

Cuando un compañero de clase estornuda cerca de nosotros, tenemos la leve esperanza de que simplemente sea alérgico a algo que flota en el aire, en vez de estar contagiado con gripe. Más de 35 millones de estadounidenses padecen **alergias**

Una reacción alérgica comienza cuando un antígeno (como el polen) entra en el cuerpo y una célula B que porta un anticuerpo a alguna molécula en la superficie del polen lo reconoce. Esta célula B prolifera y produce células plasmáticas que generan "anticuerpos alérgicos" contra los antígenos del polen. Los anticuerpos se unen a las membranas plasmáticas de los mastocitos, preparándolas para responder a posteriores exposiciones a los antígenos mediante la liberación de histamina (**FIGURA 36-13**). La histamina causa inflamación (véase la figura 36-5) y, en las vías respiratorias, una mayor secreción de mucosidad. Puesto que las sustancias que flotan en el aire, como los granos de polen, suelen entrar en la nariz y la garganta, las reacciones alérgicas resultantes a menudo incluyen el flujo nasal, los estornudos y la congestión de la "fiebre del heno".

Si una persona sufre excesivamente de alergias, particularmente al polen o al veneno de abeja o de avispa, es candidata a recibir inyecciones contra las alergias, también conocidas como *vacunas contra las alergias*, que gradualmente "entrenan" al sistema inmunitario a ignorar alérgenos específicos. El tratamiento comúnmente consiste en una serie de inyecciones de pequeñas y crecientes cantidades de alérgeno purificado. Finalmente, los síntomas alérgicos ceden, y los efectos benéficos pueden durar varios años. Aunque se desconoce el meca-


❶ La primera exposición al polen estimula las células B para que produzcan células plasmáticas "de alergia".
❷ Las células plasmáticas producen anticuerpos de alergia.
❸ Los anticuerpos de alergia se unen a los mastocitos.
❹ La reexposición al polen da por resultado la unión del polen a anticuerpos de alergia en los mastocitos.
❺ La unión del polen estimula a los mastocitos a liberar histamina, desencadenando la respuesta inflamatoria.

GUARDIÁN DE LA SALUD

El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar?

Cada año, una ola de *influenza* o gripe recorre el planeta. Cientos de miles de ancianos, recién nacidos y enfermos perecen, mientras que cientos de millones más sufren de problemas para respirar, de fiebre y de dolores musculares propios de los casos severos. De vez en cuando, aparecen variedades devastadoras de la gripe causando epidemias que se extienden por el mundo, a las que se llama *pandemias*. En la gran pandemia de gripe durante el invierno de 1918, murieron 20 millones de personas en todo el mundo. En 1968 la gripe de Hong Kong infectó a 50 millones de estadounidenses y causó 70,000 muertes en tan sólo seis semanas.

VIRUS DE LA GRIPE

Varios virus que invaden las células de las vías respiratorias causan la gripe. Los virus convierten a esas células en fábricas de nuevos virus. La superficie exterior de cada virus tiene incrustadas proteínas con forma de espigas que el sistema inmunitario reconoce como antígenos. La mayoría de las personas sobreviven a la gripe porque su sistema inmunitario por fin desactiva los virus o extermina las células del cuerpo infectadas por virus. ¿Por qué, entonces, nuestras células B y T de memoria no nos inmunizan contra brotes futuros de gripe?

La respuesta radica en la asombrosa capacidad para cambiar que tiene el virus de la gripe. Sus genes se componen de RNA, el cual cambia rápidamente. Las mutaciones en las proteínas clave de la superficie pueden evitar que el sistema inmunitario las reconozca plenamente y ataque al virus. Como nuestras células de memoria brindan sólo una protección parcial, enfermamos de gripe año tras año.

NUEVAS CEPAS MORTALES

En raras ocasiones aparecen virus de gripe drásticamente nuevos y mortales, y causan pandemias. Estos virus portan proteínas superficiales completamente nuevas que el sistema inmunitario humano nunca ha encontrado antes. Para responder, el sistema inmunitario tiene que "comenzar desde cero", seleccionando líneas totalmente nuevas de células B y T para atacar al invasor. Mientras, el virus se multiplica con tal rapidez que muchos individuos mueren o quedan tan debilitados que contraen otra enfermedad mortal.

¿De dónde salen los genes que codifican estos nuevos antígenos de la gripe? Las aves, especialmente las acuáticas migratorias como los patos, son portadores de virus extraordinariamente similares a los virus de la gripe humana, aunque no manifiesten síntomas. Tanto los virus de la gripe humana como los que portan las aves pueden infectar a los cerdos, de manera que en ocasiones ambos tipos de virus coinciden en una misma célula del cerdo. En raras ocasiones, los virus que se producen en una célula doblemente infectada de un cerdo adquieren RNA tanto de los virus humanos como de los de las aves (**FIGURA E36-2**). Del virus humano, toman los genes necesarios para infectar células humanas; del virus del ave, obtienen los antígenos superficiales para los que el sistema inmunitario humano no está preparado. Los virus híbridos ahora pueden desplazarse fácilmente de los cerdos a los humanos. Las pandemias de 1957 y 1968 surgieron de virus que combinaban rasgos de la gripe de las aves y de la que ataca a los humanos. Aunque el huésped que desempeñe la función de "recipiente mezclador" para estas cepas específicas no ha sido identificado positivamente, el cerdo es un candidato probable. Recientemente, en un notable ejemplo de trabajo de detección médica, los científicos recuperaron virus de gripe que provocó la pandemia de 1918 del cuerpo de una mujer joven enterrada en el suelo permanentemente congelado en el extremo norte. Después de determinar la secuencia de los genes, los investigadores concluyeron que el virus de las aves no se había recombinado con el de la gripe humana, sino que había adquirido mutaciones que lo hicieron sustancialmente diferente de otros virus de las aves y capaz de infectar a los seres humanos.

Una nueva cepa de gripe aviar, llamada H5N1, tiene el potencial de convertirse en una nueva pandemia. Se desplazó de aves silvestres a los pollos domesticados en Asia, donde cientos de millones de pollos fueron sacrificados en un intento por detener la diseminación del virus. Al igual que el virus de la gripe de 1918, el H5N1 ha desarrollado la capacidad de diseminarse de las aves (en este caso, los pollos) a las personas, donde tiene una elevada tasa de mortalidad. Desde 2006, la transmisión del pollo a los seres humanos y entre seres humanos es rara, pero posibles mutaciones podrían cambiar esto. Sin embargo, es inquietante el hecho de que el virus H5N1 se haya encontrado en cerdos. Los científicos están preocupados de que los cerdos o las personas infectados de manera simultánea con el H5N1 y la gripe humana se conviertan en organismos de combinación de los cuales podría surgir una versión mucho más infecciosa de la gripe aviar. Como resultado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que el mundo esté preparado para una nueva pandemia.

CÓMO ATACAR AL VIRUS DE LA GRIPE

Las vacunas son la mejor defensa contra la gripe, pero ¿cómo pueden proteger contra las mutaciones del virus? Cada año, funcionarios de la OMS toman muestras de mutaciones del virus de la gripe de 112 lugares de 83 países. Los investigadores analizan las distintas cepas e identifican las tres que tienen mayor probabilidad de difundirse ampliamente. Se permite que esos virus se multipliquen en huevos de gallina fertilizados, y luego las proteí-

nismo exacto, las vacunas contra las alergias disminuyen la producción de anticuerpos a los alérgenos y, por consiguiente, reducen las respuestas inflamatorias que causan.

Una enfermedad autoinmune es una respuesta inmunitaria contra las moléculas del propio cuerpo

Por fortuna, nuestro sistema inmunitario casi nunca confunde a nuestras propias células con invasores. No obstante, hay raras ocasiones en que algo falla y se producen anticuerpos contra uno mismo. La razón de esto aún no se comprende del todo; una hipótesis es que los organismos patógenos en ocasiones llevan antígenos que se parecen a las proteínas en las células del cuerpo del individuo. Después de una infección con tales patógenos, los anticuerpos podrían atacar equivocadamente algunas de las propias células del individuo. El resultado es una **enfermedad autoinmune**, en la que el cuerpo efectúa una respuesta inmunitaria en contra de un tipo particular de células que deberían reconocerse como propias. Por ejemplo, algunos tipos de anemia son resultado de anticuerpos que destruyen los glóbulos rojos de la persona. Muchos casos de diabetes juvenil se presentan porque el sistema inmunitario ataca a las células del páncreas que secretan insulina. La esclerosis múltiple se debe a que células inmunitarias lanzan un ataque equivocado contra la vaina de grasa aislante que recubre partes de las neuronas en el cerebro y la médula espinal. La artritis reumatoide se presenta cuando el sistema inmunitario ataca el cartílago de las articulaciones. Por desgracia, todavía no se ha encontrado una cura para las enfermedades autoin-

nas virales se aíslan e inyectan en las personas para estimular una respuesta inmunitaria que las proteja contra infecciones subsiguientes de esas cepas. Las vacunas para la gripe suelen ser muy eficaces, sobre todo si se seleccionaron las cepas correctas. A quienes están en una situación particularmente peligrosa para contraer gripe se les administran *inhibidores de neuraminidasa* (como Tamiflu[MR]). La enzima viral neuraminidasa permite que los virus recién formados escapen de sus células huésped. Administrados inmediatamente después de que se inician los síntomas de la gripe, estos medicamentos interrumpen el ciclo vital de los virus y aceleran la recuperación.

Sin embargo, por desgracia, el mundo no está preparado para una pandemia. En tal caso, las vacunas existentes y la inmunidad previa resultarían inútiles. Existen diversos intentos por desarrollar una vacuna contra el H5N1, pero la rápida tasa de mutación de los virus podría socavar la efectividad de una vacuna. El anticuado método de cultivar virus en huevos de gallinas requiere de tiempo, y las instalaciones para la producción de vacunas son limitadas; estos factores obstaculizan la rápida producción de las enormes cantidades de dosis que se necesitarían para prevenir una pandemia. Los medicamentos antivirales como Tamiflu[MR] pueden ser efectivos; pero una cepa del H5N1 parece haberse vuelto resistente a ese medicamento. Los funcionarios de salud pública esperan hacer acopio de reservas tanto de medicamentos antivirales como de vacunas en contra de la gripe aviar y hacerlos accesibles tan pronto como se detecte un brote, en un esfuerzo por detener una potencial pandemia antes de que el virus se disemine. Sin embargo, no se sabe exactamente cuándo se presentará otra pandemia y qué tan eficaz será la respuesta mundial ante ella.

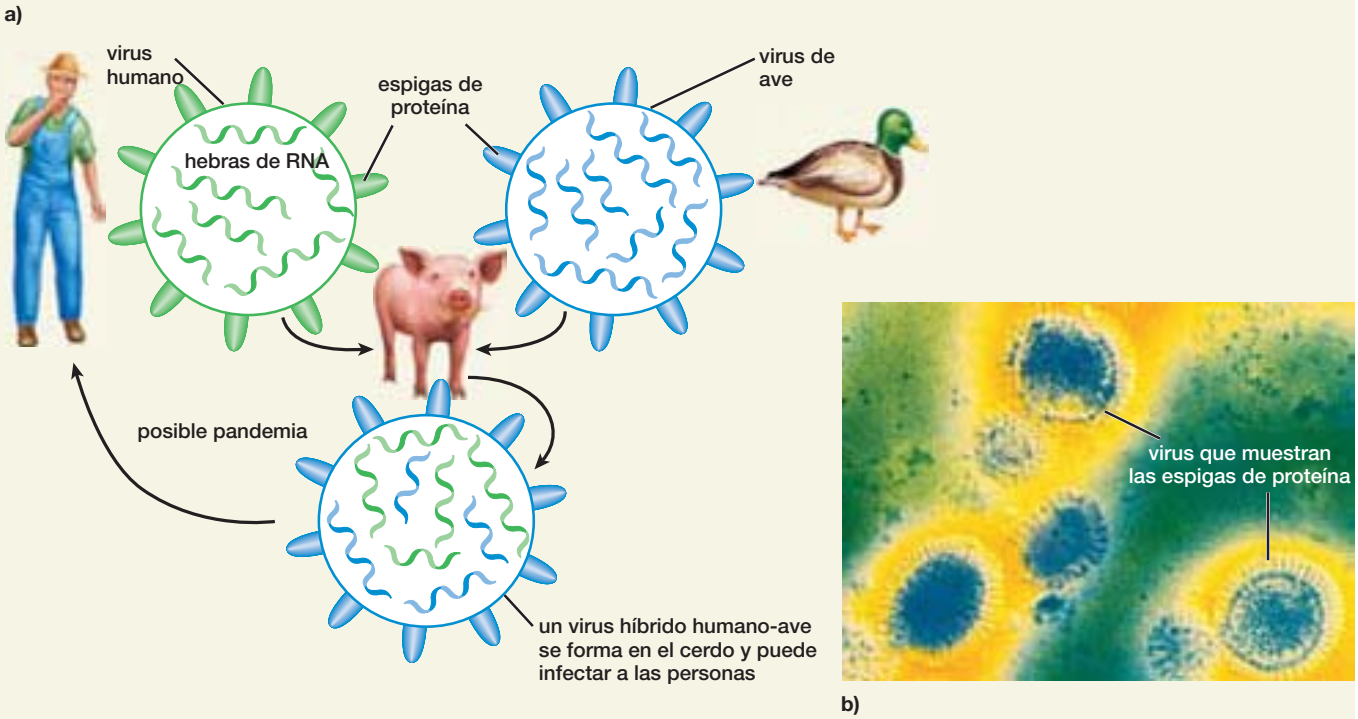

a)
virus humano
hebras de RNA
espigas de proteína
virus de ave
posible pandemia
un virus híbrido humano-ave se forma en el cerdo y puede infectar a las personas
virus que muestran las espigas de proteína
b)

FIGURA E36-2 Formación de nuevas y mortales variedades de gripe
a) La recombinación de genes de virus de la gripe humana y de aves, que se efectúa rara vez, puede producir nuevas cepas mortales. ***b)*** Micrografía electrónica de transmisión del virus de la gripe. Las espigas de proteínas se unen a las células del aparato respiratorio humano y ayudan al virus al penetrar en ellas. Si las proteínas de las espigas se derivan del virus de las aves, pueden ser totalmente nuevas para el sistema inmunitario humano.

munes. Algunas terapias alivian los síntomas, como la administración de insulina a los diabéticos o la transfusión de sangre a los anémicos. Como alternativa, la respuesta inmunitaria se puede suprimir con medicamentos, aunque esto también reduce las respuestas inmunitarias a los ataques cotidianos de microbios patógenos, lo cual es una importante desventaja de esta terapia.

Una enfermedad de deficiencia inmunitaria incapacita al sistema inmunitario

David, el "niño de la burbuja", vivió los 12 años de su corta vida en una "burbuja" a prueba de gérmenes, sin que jamás hubiera tocado objeto no esterilizado, incluidas otras personas (**FIGURA 36-14**). Rara vez nace un bebé como David, con **deficiencia inmunitaria combinada grave** (*severe combined immune deficiency*, SCID), un trastorno provocado por un gen defectuoso que hace que se formen muy pocas células inmunitarias, o ninguna. Un bebé con SCID puede sobrevivir los primeros meses de vida postnatal protegido por los anticuerpos que adquirió de la madre durante el embarazo o la lactancia. Sin embargo, una vez que se pierden esos anticuerpos, las infecciones bacterianas comunes pueden ser mortales. Una forma de terapia que está en proceso de desarrollo consiste en retirar la médula ósea (donde se producen las células inmunitarias) al bebé con SCID. Los médicos utilizan técnicas de ingeniería genética para insertar una copia funcional del gen defectuoso en el DNA de las células de la médula. Las células modificadas de la médula se inyectan en el torrente

FIGURA 36-14 David, el "niño de la burbuja"
David nació con un defecto genético que impedía la formación de células inmunitarias, por lo que tuvo que vivir su corta vida en un ambiente a prueba de gérmenes.

sanguíneo de la víctima de SCID. En casos exitosos, las células se instalan en la médula ósea, proliferan y estimulan la formación de células inmunitarias sanas.

El SIDA es una devastadora enfermedad de deficiencia inmunitaria

La enfermedad de deficiencia inmunitaria más común y extendida es el **síndrome de inmunodeficiencia adquirida**, o **SIDA**. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estimó que en 2005 más de tres millones de personas murieron de SIDA y que casi cinco millones más se infectaron, con lo que la población total infectada ascendió a 40 millones. El SIDA es causado por los **virus de inmunodeficiencia humana (VIH)**. Estos virus socavan el sistema inmunitario infectando y destruyendo las células T auxiliares, las cuales estimulan las respuestas inmunitarias, tanto la humoral como la mediada por células. El SIDA no mata al enfermo directamente, sino que lo vuelve cada vez más susceptible a otras enfermedades, a medida que se reducen sus poblaciones de células T auxiliares. Aunque apenas se le reconoció en 1981, estudios genéticos indican que el virus del SIDA casi con seguridad surgió de virus que han infectado a chimpancés en África durante miles de años. Los investigadores creen que este virus ancestral sufrió mutaciones y adquirió la capacidad de infectar a los seres humanos a mediados de la década de 1940 o principios de la de 1950.

El virus de inmunodeficiencia humana infecta y destruye a las células T auxiliares

¿Cómo hace el virus VIH para causar estragos en el sistema inmunitario humano? Como la mayoría de los virus, entra en una célula huésped (en este caso una célula T auxiliar) y "secuestra" la maquinaria metabólica de la célula, forzándola a elaborar más partículas de VIH que luego emergen y toman su envoltura externa de la membrana de la célula T (**FIGURA 36-15**). En el periodo inicial de la infección, conforme el sistema inmunitario lucha contra el virus, la víctima presenta fiebre, erupciones cutáneas, dolores musculares, jaquecas y ganglios linfáticos inflamados. Después de varios meses, la tasa de duplicación viral se reduce. Suficientes células T auxiliares recuerdan que los individuos infectados son capaces de resistir las enfermedades y, en general, se sienten bastante bien. En algunos casos, esta condición persiste durante varios años. Sin embargo, si no se imparte tratamiento, los niveles de células T auxiliares tarde o temprano disminuyen, lo que debilita severamente la respuesta inmunitaria y, para entonces, la persona manifiesta el SIDA. Conforme los niveles de VIH se disparan considerablemente, exterminan más células T auxiliares, y la persona se vuelve presa fácil para otras infecciones. La expectativa de vida para las víctimas de SIDA que no reciben tratamiento es de uno o dos años.

El virus de inmunodeficiencia humana se transmite por los líquidos corporales

El VIH no puede sobrevivir mucho tiempo fuera del cuerpo y sólo puede transmitirse por contacto directo entre la piel o membranas mucosas rotas y líquidos corporales cargados de virus, como sangre, semen, secreciones vaginales y leche materna. La infección de VIH se puede propagar por actividad sexual, o cuando usuarios de drogas intravenosas comparten la misma aguja, o por trasfusiones de sangre (lo cual es muy poco frecuente, al menos en los países industrializados, donde se adoptó la práctica de hacer una prueba de anticuerpos de VIH a toda la sangre donada). Una mujer infectada con VIH puede transmitir el virus a su hijo durante el embarazo, el parto o al amamantarlo.

Hay tratamientos parcialmente efectivos para el SIDA, pero no hay cura

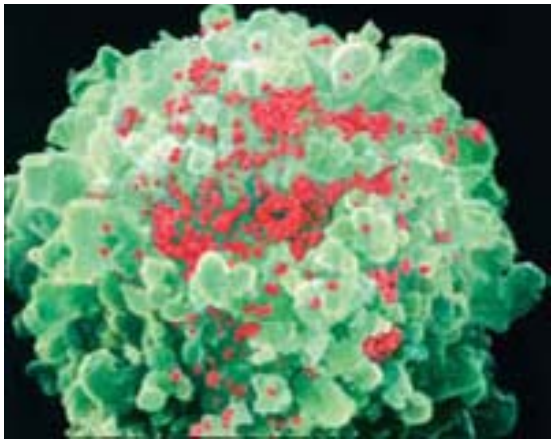
Nuevos medicamentos pueden desactivar el VIH y detener el progreso del SIDA. La expectativa promedio de vida para individuos portadores del VIH que reciben la mejor atención médica es de 24 años, un periodo mucho más prolongado que la esperanza de vida antes de que se desarrollaran tales medicamentos. Son particularmente efectivas las combinaciones de fármacos que atacan en diferentes etapas de la duplicación del virus, y en la actualidad existe un tratamiento completo para el SIDA concentrado en píldoras que se toman una vez al día. Por desgracia, el VIH puede mutar en formas resistentes a los medicamentos; y, en algunos pacientes, los fármacos tienen graves efectos colaterales.

Es obvio que la mejor solución sería crear una vacuna para el SIDA. Pero esto presenta grandes dificultades porque el VIH desactiva la respuesta humana de la que depende una vacuna. Además, el VIH tiene una tasa de mutación increíble, quizá unas mil veces más rápida que la de los virus de la gripe. Individuos infectados podrían albergar diferentes cepas de VIH en la sangre y el semen por las mutaciones que ocurren dentro de sus cuerpos después de que fueron infectados. A pesar de que se han invertido miles de millones de dólares en investigaciones y en pruebas con animales y seres humanos, aún no se cuenta con una vacuna eficaz contra el VIH.

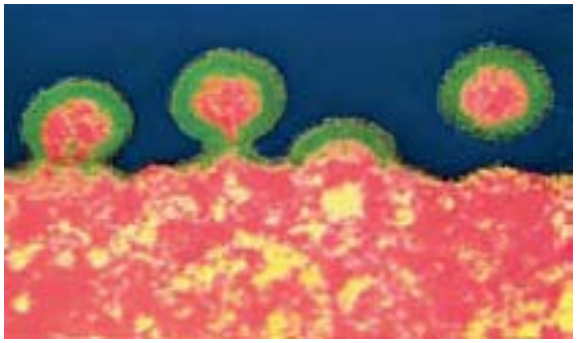
El cáncer puede evadir o abatir la respuesta inmunitaria

Cáncer es una de las palabras más temidas del idioma, y con razón. Esta enfermedad es la segunda causa de muerte en Estados Unidos, sólo después de las enfermedades cardiacas. Un 40 por ciento de los estadounidenses contraerán cáncer tarde o temprano. Pese a décadas de intensa investigación, aún no existe una cura satisfactoria para esta enfermedad. ¿Por qué no podemos curar ni prevenir el cáncer?

A diferencia de otras enfermedades, el cáncer no es una invasión directa del cuerpo por parte de un organismo extraño. Si bien algunos tipos de cáncer son iniciados por virus, en esencia, el cáncer es una falla en los mecanismos que controlan el crecimiento de las propias células del cuerpo; es una enfermedad en la que el cuerpo se destruye a sí mismo. Los mecanismos utilizados en la regulación de la división celular y las mutaciones genéticas que causan cáncer se explican en el capítulo 11.



a)



b)

FIGURA 36-15 El VIH causa el SIDA
a) Los puntos rojos en esta micrografía electrónica de barrido son virus de VIH que acaban de salir de una gran célula T auxiliar (en verde), infectada recientemente. ***b)*** En esta micrografía electrónica de transmisión, virus de VIH emergen de la célula T auxiliar y, en el proceso, adquieren una envoltura exterior de membrana plasmática (verde). Esto les permitirá infectar nuevas células.

El **cáncer** es una enfermedad caracterizada por el crecimiento sin control de células malignas que forman un **tumor**, el cual es una población de células que han escapado de los procesos reguladores normales y crecen a un ritmo anormal. Las células de un *tumor benigno* normalmente quedan confinadas a una sola área, pero las de un *tumor maligno* crecen de forma descontrolada y se extienden a otras partes del cuerpo. Al crecer, un tumor maligno usa cantidades cada vez mayores de los suministros de energía y nutrimentos del cuerpo y presiona a los órganos vitales cercanos.

El sistema inmunitario se defiende de las células cancerosas

Todos los días se forman células cancerosas en nuestro cuerpo. Es casi imposible evitar algunos *carcinógenos* (agentes causantes de cáncer), como los rayos gamma del Sol, la radiactividad de las rocas del suelo y los carcinógenos naturales contenidos en los alimentos. Por fortuna, las células asesinas y las células T citotóxicas vigilan el cuerpo en busca de células cancerosas y destruyen casi todas, antes de que tengan oportunidad de proliferar y diseminarse. Las células cancerosas, desde luego, pertenecen a la categoría de lo "propio" (son células del cuerpo), y el sistema inmunitario no responde a lo "propio". ¿Cómo entonces se eliminan las células cancerosas? Es probable que los procesos mismos que causan el cáncer también hagan que aparezcan nuevas proteínas, ligeramente distintas, en la superficie de las células cancerosas. Las células T citotóxicas encuentran esas proteínas nuevas, las reconocen como antígenos extraños y destruyen a las células cancerosas (véase la figura 36-10). No obstante, cabe la posibilidad de que algunas células cancerosas evadan la detección porque no portan los antígenos que permitirían al sistema inmunitario reconocerlas como extrañas. Algunos tipos de cáncer, como la leucemia, suprimen la actividad del sistema inmunitario; y otros simplemente se desarrollan tan rápido que rebasan a la respuesta inmunitaria. Si el tumor crece y se extiende, la salud del individuo dependerá del tratamiento médico que reciba.

Los tratamientos médicos para el cáncer dependen de distinguir y matar selectivamente a las células cancerosas

Las tres formas principales de tratamiento para el cáncer son cirugía, radiación y quimioterapia. La eliminación quirúrgica del tumor es el primer paso en el tratamiento de muchos cánceres, pero, por desgracia, en ocasiones es difícil eliminar todos los fragmentos de tejido canceroso. Una alternativa es bombardear las células cancerosas con radiación para exterminarlas; la radiación puede destruir incluso cúmulos microscópicos de células cancerosas, alterando su DNA e impidiendo que se dividan y crezcan. Por desgracia, ni la cirugía ni la radiación son efectivas contra el cáncer que se ha diseminado por todo el cuerpo.

La *quimioterapia*, o tratamiento con fármacos, suele utilizarse para complementar la cirugía y/o la radiación, o para tratar cánceres que no se pueden combatir con cirugía ni con radiación. Los medicamentos de la quimioterapia atacan a la maquinaria de la división celular. Puesto que las células cancerosas se dividen con mayor frecuencia que las células normales, se espera que los ataques contra células en división maten selectivamente a las células cancerosas. El problema es que también otras células del cuerpo se están dividiendo y es inevitable que la quimioterapia mate a algunas células sanas. Son los daños que sufren las células en división de los folículos capilares y del recubrimiento intestinal los que producen los bien conocidos efectos colaterales de pérdida de cabello, náuseas y vómito.

Se ha dedicado una cantidad enorme de trabajo de investigación a la búsqueda de tratamientos para el cáncer que sean más eficaces y tengan menos efectos colaterales desagradables. La creación de una "vacuna para el cáncer" es prioritaria. Otros enfoques incluyen: **1.** desarrollar terapias que estimulen el sistema inmunitario para que ataque a los tumores, y **2.** la creación de anticuerpos o receptores de células T que reconozcan las células tumorales y puedan llevar fármacos o partículas radiactivas directamente a las células cancerosas sin afectar a las sanas. Las investigaciones y las pruebas clínicas continúan, y quizá los pacientes con cáncer puedan obtener pronto los beneficios de nuevos e innovadores tratamientos.

Sin la constante vigilancia de las defensas del cuerpo, es poco probable que cualquiera de nosotros sobreviviera más de unos cuantos años. Sin embargo, podemos reducir la probabilidad de desarrollar cáncer si evitamos el humo del cigarrillo y adoptamos una dieta rica en frutas y verduras. Otras conductas que aminoran el riesgo de contraer cáncer son evitar el consumo excesivo de alcohol, usar filtros solares y hacer ejercicio con regularidad.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO LUCHA CONTRA LA GRIPE

Para asegurarte de que no te has contagiado de gripe aviar, tu médico te explica que aunque la tasa de mortalidad por este tipo de gripe es elevada, muy pocas personas en el mundo han contraído esta enfermedad. Los síntomas son similares a los de otras formas de gripe, pero las muertes son provocadas por síntomas parecidos a los de la neumonía que en ocasiones se desarrolla. El médico te aplica una vacuna contra la gripe, por desgracia, demasiado tarde. Se requieren unas cuantas semanas para que una inyección active el sistema inmunitario de una persona de manera que reconozca y recuerde el virus. Unos cuantos días después de que tu compañera de clase estornudó cerca de ti, empiezas a sentir dolores de cabeza, tu garganta está irritada y tienes escalofríos y fiebre. Pero no sólo eso, tienes dolor en los músculos y tu piel se vuelve hipersensible. ¿Qué sucede? La mayoría de los síntomas desagradables de la gripe y otras infecciones son provocados por las defensas no específicas del cuerpo. Conforme los macrófagos ingieren los virus, liberan citocinas, como el pirógeno que causa la fiebre. Las citocinas también sensibilizan las terminaciones nerviosas del dolor en todo el cuerpo; por eso sientes dolor en la espalda, punzadas en antiguas lesiones, y tu piel protesta cuando te cambias de ropa. Las citocinas también provocan cansancio. ¿Por qué nuestro cuerpo produce estos síntomas desagradables? Los biólogos sostienen la hipótesis de que ese estado de malestar hacía que nuestros ancestros buscaran la seguridad de sus cuevas —y a nosotros nos hace abrigarnos en cama— con el fin de conservar la energía para las batallas que el cuerpo debía (y debe) librar contra los invasores microscópicos.

Cuando finalmente te recuperes de la gripe, estarás a salvo de volverte a contagiar este año, hasta que el próximo aparezca una forma mutante del virus. Si hay vacunas a la disposición y son seguras para ti, considera que te apliquen una al iniciar la temporada de la gripe.

Piensa en esto Cuando una infección como un resfriado o una gripe te hacen sentir mal, ¿cuántos de tus síntomas son provocados por los esfuerzos del sistema inmunitario para combatirla? Muchos medicamentos que se venden sin receta médica pretenden suprimir estos síntomas (fiebre, tos, flujo nasal, dolores, etcétera). Discute las ventajas y las desventajas de tomar medicamentos que suprimen los síntomas de la enfermedad.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

36.1 ¿Cuáles son los mecanismos de defensa básicos contra la enfermedad?

Primero, las barreras externas no específicas, que incluyen estructuras anatómicas y secreciones, como la piel, el pelo, los cilios y las mucosidades, evitan que los organismos causantes de enfermedades entre fácilmente en el cuerpo. Segundo, las defensas internas no específicas consisten en una variedad de glóbulos blancos que no sólo destruyen microbios, toxinas y células del cuerpo cancerosas e infectadas, sino que también fagocitan células muertas o a punto de morir. Por último, la respuesta inmunitaria específica destruye de forma selectiva la toxina o microbio particular y "recuerda" al invasor, lo que permite una respuesta más rápida si éste reaparece en el futuro.

Web tutorial 36.1 La respuesta inflamatoria

36.2 ¿Cómo funcionan las defensas no específicas?

La piel y las secreciones bloquean físicamente la entrada de microbios en el cuerpo e inhiben su crecimiento. Las membranas mucosas de los tractos respiratorio y digestivo secretan sustancias antibióticas y moco que atrapan los microbios. Si éstos logran entrar en el cuerpo, los glóbulos blancos se encargan de fagocitarlos. Las células asesinas naturales secretan proteínas que exterminan las células infectadas o cancerosas. Las heridas estimulan la respuesta inflamatoria, en la que se liberan sustancias químicas que atraen glóbulos blancos fagocíticos, incrementan el flujo de sangre y hacen porosos los capilares. Luego, coágulos sanguíneos tapan el sitio de la herida. La fiebre es provocada por pirógenos endógenos, sustancias químicas que liberan los glóbulos blancos en respuesta a la infección. Las altas temperaturas inhiben el crecimiento de bacterias y aceleran la respuesta inmunitaria.

Web tutorial 36.2 Inmunidad humoral frente a inmunidad mediada por células

36.3 ¿Qué características clave tiene la respuesta inmunitaria?

En la respuesta inmunitaria intervienen dos tipos de células inmunitarias o linfocitos: células B y células T. Las células plasmáticas, que son descendientes de las células B, secretan anticuerpos al torrente sanguíneo y producen inmunidad humoral. Las células T citotóxicas destruyen algunos microbios, células cancerosas y células infectadas por virus mediante contacto y producen la inmunidad mediada por células. Las células T auxiliares estimulan tanto la respuesta inmunitaria humoral como mediada por células. Las respuestas inmunitarias comprenden tres pasos: **1.** reconocimiento; **2.** Primero, los anticuerpos (en las células B o sus descendientes, las células plasmáticas) y los receptores de células T (en las células T) reconocen moléculas ajenas y activan la respuesta inmunitaria. Los anticuerpos son proteínas con forma de Y formadas por una región constante y una región variable. Los antígenos son moléculas que generan una respuesta de anticuerpos. Los anticuerpos se unen y ayudan a destruir los antígenos. Cada célula B sintetiza un solo tipo de anticuerpo, exclusivo de esa célula y de su progenie. La diversidad de los anticuerpos es resultado de la permutación de genes durante el desarrollo de las células B. Cada anticuerpo tiene sitios específicos que se unen a un solo tipo de antígenos, o a unos cuantos. Normalmente, las células B sólo reconocen antígenos ajenos.

Segundo, los anticuerpos atacan a los invasores. Los antígenos de un invasor se unen a las células B y T que tienen los anticuerpos o receptores complementarios y las activan. En la inmunidad humoral, las células B con los anticuerpos correctos, estimuladas por la presencia de antígenos específicos, se dividen rápidamente para producir células plasmáticas que sintetizan grandes cantidades del anticuerpo. Los anticuerpos en circulación destruyen a los antígenos y a los microbios que los llevan. En la inmunidad mediada por células, las células T que poseen los receptores correctos se unen a los antígenos y se dividen rápidamente. Las células T citotóxicas se unen a antígenos presentes en microbios, células infectadas o células cancerosas y matan a las células. Las células T auxiliares estimulan químicamente las respuestas tanto de las células B como de las células T citotóxicas.

Por último, parte de la progenie de las células B y T se convierte en células de memoria longevas. Si el mismo antígeno reaparece en el torrente sanguíneo, estas células de memoria se activarán de inmediato, se dividirán rápidamente y causarán una respuesta inmunitaria mucho más rápida y eficaz que la respuesta original.

Web tutorial 36.3 Las células B de memoria y la respuesta inmunitaria

36.4 ¿Cómo logra la atención médica mejorar la respuesta inmunitaria?

Los antibióticos matan a los microbios o frenan su reproducción, lo que da al sistema inmunitario más tiempo para responder a los invasores y exterminarlos. Las vacunas son inyecciones de antígenos de organismos patógenos y algunas contienen a los microbios mismos, pero debilitados o muertos. Los antígenos provocan una respuesta inmunitaria, la cual crea memoria y da pie a una respuesta rápida, si se presenta una infección real.

36.5 ¿Qué sucede cuando el sistema inmunitario no funciona correctamente?

Las alergias son respuestas inmunitarias a sustancias ajenas normalmente inocuas. Las células B tratan estas sustancias como antígenos y producen "anticuerpos de alergia" que se unen a los mastocitos. Estos últimos, al verse expuestos a los antígenos, responden liberando histamina, que causa una respuesta inflamatoria local. Se presentan enfermedades autoinmunes cuando el sistema inmunitario confunde las propias células del cuerpo con invasores y las destruye. Las enfermedades de deficiencia inmunitaria se presentan cuando el sistema inmunitario no puede responder con la intensidad suficiente para combatir enfermedades que normalmente son menores.

La infección con virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) casi siempre causa SIDA (síndrome de inmunodeficiencia adquirida). Estos virus invaden a células T auxiliares y las destruyen. La falta de células T auxiliares para estimular las respuestas inmunitarias de las células B y las células T citotóxicas hace que la persona que padece SIDA sea muy susceptible a una amplia variedad de infecciones, que finalmente le causan la muerte. Nuevas combinaciones de medicamentos antivirales han aumentado drásticamente la expectativa y la calidad de vida de las víctimas infectadas con VIH que tienen acceso a un cuidado médico de calidad.

El cáncer es una población de células del cuerpo que se divide de forma descontrolada. El sistema inmunitario puede reconocer a las células cancerosas como "diferentes" y destruirlas con células asesinas naturales y células T citotóxicas. Unas cuantas células cancerosas desarrollan la capacidad de evadir al sistema inmunitario, algunas atacan a las células inmunitarias y otras se multiplican con demasiada rapidez como para que el sistema inmunitario pueda combatirlas con eficiencia. En tales casos, el cáncer se desarrolla.

Web tutorial 36.4 VIH: El virus del SIDA

TÉRMINOS CLAVE

alergia *pág. 733*
anticuerpo *pág. 726*
antígeno *pág. 726*
cáncer *pág. 737*
célula asesina natural *pág. 724*
célula B *pág. 726*
célula B de memoria *pág. 729*
célula plasmática *pág. 729*
célula T *pág. 726*
célula T auxiliar *pág. 729*
célula T citotóxica *pág. 730*
célula T de memoria *pág. 730*
citocina *pág. 724*
complejo mayor de histocompatibilidad (MHC) *pág. 728*
deficiencia inmunitaria combinada grave (SCID) *pág. 735*
enfermedad autoinmune *pág. 734*
fagocito *pág. 723*
fiebre *pág. 723*
histamina *pág. 724*
inmunidad humoral *pág. 729*
inmunidad mediada por células *pág. 729*
leucocito *pág. 723*
linfocito *pág. 725*
macrófago *pág. 724*
mastocito *pág. 724*
microbio *pág. 722*
neutrófilo *pág. 724*
parásito *pág. 722*
patógeno *pág. 722*
receptor de célula T *pág. 726*
región constante *pág. 726*
región variable *pág. 726*
respuesta inflamatoria *pág. 724*
respuesta inmunitaria *pág. 722*
selección clonal *pág. 729*
síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA) *pág. 736*
sistema de complemento *pág. 730*
sistema inmunitario *pág. 725*
tumor *pág. 737*
vacuna *pág. 732*
virus de inmunodeficiencia humana (VIH) *pág. 736*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Menciona las tres líneas de defensa del cuerpo humano contra microbios invasores. ¿Cuáles no son específicas (es decir, actúan contra todo tipo de invasores) y cuáles son específicas (sólo actúan contra un tipo de invasores)? Explica tu respuesta.
2. ¿Cómo destruyen a sus blancos las células asesinas naturales y las células T citotóxicas?
3. Describe la inmunidad humoral y la mediada por células. Incluye en tu respuesta los tipos de células inmunitarias que intervienen en cada caso, la ubicación de los anticuerpos y receptores que se unen a los antígenos ajenos y los mecanismos por los que se destruyen las células invasoras.
4. ¿Cómo forma tantos anticuerpos distintos el sistema inmunitario?
5. ¿Cómo distingue el cuerpo entre lo "propio" y lo "ajeno"?
6. Diagrama la estructura de un anticuerpo. ¿Qué partes se unen a los antígenos? ¿Por qué cada anticuerpo se une sólo a un antígeno específico?
7. ¿Qué son las células de memoria? ¿Cómo contribuyen a la inmunidad duradera frente a enfermedades específicas?
8. ¿Qué es una vacuna y cómo confiere inmunidad a una enfermedad?
9. ¿Cómo es que la respuesta inflamatoria ayuda al cuerpo a resistir la enfermedad? ¿Qué síntomas de alergia causa?
10. Distingue entre enfermedades autoinmunes y enfermedades de deficiencia inmunitaria y da un ejemplo de cada una.
11. Describe las causas y los resultados finales del SIDA. ¿Cómo funcionan los tratamientos para el SIDA? ¿Cómo se propaga el VIH?
12. ¿Por qué el cáncer a veces es mortal?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. ¿Por qué es indispensable que los anticuerpos y receptores de células T se unan sólo a moléculas relativamente grandes (como las proteínas) y no a las más pequeñas (como los aminoácidos)?
2. El ensayo "Guardián de la salud: El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar?" dice que el virus de la gripe es diferente cada año. En tal caso, ¿de qué sirve "vacunarse contra la gripe" cada invierno?
3. Discute las ventajas y desventajas del experimento que realizó Jenner. ¿Podría efectuar un experimento semejante en la actualidad?
4. Los pacientes a los que se trasplantan órganos por lo regular reciben el fármaco ciclosporina, el cual inhibe la producción de una citocina que estimula la proliferación de células T auxiliares. ¿Cómo evita la ciclosporina el rechazo de los órganos trasplantados? Algunos pacientes que recibieron con éxito trasplantes hace muchos años ahora están desarrollando diversos tipos de cáncer. Elabora una hipótesis que explique este fenómeno.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Hamilton, G. "Filthy Friends". *Scientific American*, 16 de abril de 2005. ¿El hecho de mantener nuestro ambiente sumamente limpio altera el sistema inmunitario en formas que nos predisponen a las alergias y a contraer asma?

MacKenzie, D. "The Bird Flu Threat". *New Scientist*, 7 de enero de 2006. ¿La gripe aviar podría dar origen a la siguiente pandemia?

Taubenberger, J. K., Reid, A. H. y Fanning, T. G. "Capturing a Killer Flu Virus". *Scientific American*, enero de 2005. Describe el trabajo de investigación que llevó a la resurrección de la epidemia de gripe más mortal registrada en la historia.

CAPÍTULO 37

Control químico del organismo animal: El sistema endocrino

En el "juego" del uso y la detección de drogas, el profesor Catlin compite con algunos de los mejores atletas del mundo. En ocasiones se frustra por esta continua batalla y por la deshonra que representa para los deportes el comportamiento de algunos atletas defraudadores. (Imagen en recuadro) Melissa Price celebra un lanzamiento de martillo que le valió el triunfo.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Perder por el uso de hormonas artificiales

37.1 ¿Cómo se comunican las células animales?

37.2 ¿Qué características tienen las hormonas animales?

Las hormonas locales se difunden hacia las células blanco adyacentes

El torrente sanguíneo transporta las hormonas del sistema endocrino

Las hormonas se unen a receptores específicos en las células blanco

Mecanismos de retroalimentación regulan la liberación de hormonas

Las hormonas endocrinas de vertebrados e invertebrados tienen asombrosas similitudes

37.3 ¿Qué estructuras y hormonas constituyen el sistema endocrino de los mamíferos?

Los mamíferos tienen glándulas tanto exocrinas como endocrinas

El hipotálamo controla las secreciones de la glándula hipófisis (pituitaria)

Las glándulas tiroides y paratiroides influyen en el metabolismo y en los niveles de calcio

El páncreas es una glándula tanto exocrina como endocrina

Los órganos sexuales secretan hormonas esteroides

Las glándulas suprarrenales tienen dos partes que secretan hormonas distintas

Guardián de la Tierra: Engaño endocrino

Otras fuentes de hormonas comprenden la glándula pineal, el timo, los riñones, el corazón, el tracto digestivo y las células grasas

Enlaces con la vida: Más cerca de la cura de la diabetes

Conexiones evolutivas: La evolución de las hormonas

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Perder por el uso de hormonas artificiales

ESTUDIO DE CASO

PERDER POR EL USO DE HORMONAS ARTIFICIALES

ERA EL VERANO DE 2003 cuando los oficiales de la Agencia Antidoping de Estados Unidos recibieron una información anónima. El informante, ahora identificado como un entrenador de pista y campo bien conocido, afirmaba que atletas profesionales estaban usando un esteroide que escapaba a las pruebas de detección. Como evidencia, el informante envió por correo una jeringa usada que aún contenía residuos de la sustancia. Los oficiales pidieron al doctor Don Catlin y a su equipo de científicos del Laboratorio Olímpico de Análisis de la UCLA que la identificaran.

En un edificio poco notorio, Catlin trabaja con un equipo de unas 40 personas. El laboratorio de gran renombre mundial cuenta con equipo de alta tecnología de millones de dólares que permite efectuar pruebas para más de 200 sustancias prohibidas por asociaciones atléticas. De éstas, probablemente las más notorias son los esteroides anabólicos. El término *esteroide anabólico* se utiliza para describir cualquiera de las docenas de fármacos que mejoran el rendimiento y cuya composición química se asemeja a la de la hormona masculina testosterona. Los físico-constructivistas a menudo los consumen, y se ha descubierto que algunos atletas profesionales y olímpicos los utilizan ilegalmente. El rastro químico que dejan en el cuerpo se detecta en la orina incluso meses después de que una persona ha dejado de usarlos.

El profesor Catlin junto con su equipo de químicos, se dio a la tarea de analizar la pequeña cantidad de sustancia que pudo obtenerse al enjuagar la jeringa y así determinar su fórmula química. Con base en su estructura, Catlin la llamó tetrahidrogestrinona o THG. La molécula era nueva para la ciencia, lo que probó que la creación de versiones de testosterona sintética que escapan a la detección es un negocio suficientemente grande como para comprometer los esfuerzos de químicos calificados. Esto también hace pensar que es muy probable que se estén desarrollando más versiones de la sustancia.

La Food and Drug Administration de Estados Unidos (FDA) prohibió de inmediato la nueva sustancia. Como los oficiales conservan en grandes refrigeradores y durante años las muestras de orina que se analizan para las competencias atléticas importantes, pudieron recuperarlas para volver a efectuar pruebas. Los resultados fueron alarmantes. Aunque probablemente la THG sólo se fabricaba en un laboratorio de California, la sustancia había manchado al fútbol y béisbol profesionales, al igual que a las competencias de pista y campo. Por ejemplo, la lanzadora de martillo Melissa Price (imagen en recuadro) dio resultado positivo para la THG después de ganar el Campeonato de Estados Unidos en 2003. Aunque la deportista niega haber utilizado THG, ella y otros atletas fueron despojados de sus títulos y se les prohibió participar en competencias durante dos años con base en los resultados de las pruebas de orina realizadas por Catlin.

Conforme leas este capítulo, observa los diferentes efectos que una misma hormona puede tener en el cuerpo. ¿Cuáles son los efectos de tomar esteroides anabólicos? ¿Existen riesgos de salud asociados con su uso?

37.1 ¿CÓMO SE COMUNICAN LAS CÉLULAS ANIMALES?

En todos los organismos multicelulares, las células individuales deben permanecer en continua comunicación entre sí (tabla 37-1). En algunos tejidos especializados, como el músculo cardiaco, las *uniones abiertas* unen directamente el interior de las células, lo que permite que fluyan los iones y las señales eléctricas. Más comúnmente, las células liberan moléculas que transmiten señales químicas y a las que se conoce como "moléculas mesanjeras" que afectan otras células, ya sea adyacentes o distantes. Al igual que sucede en una conversación en una fiesta concurrida, esta comunicación se dirige hacia células "blanco" específicas (en la analogía anterior, las personas con las que platicas) y no a otras (los invitados que, aunque están cerca, sostienen sus propias conversaciones). Para asegurarse de que el mensaje químico llega a los blancos apropiados, las células tienen **receptores**, es decir, moléculas proteicas especializadas que se unen sólo con mensajeros químicos específicos. Los receptores pueden estar localizados ya sea en la membrana plasmática o en el interior de las células blanco. Al unirse con su receptor, la sustancia química activa un tipo de cambio dentro de la célula blanco.

Existen tres clases de moléculas mensajeras, cada una de las cuales utiliza un sistema de distribución diferente: las *hormonas locales* se difunden a través del líquido intersticial a las células más cercanas; las *hormonas endocrinas* se liberan en la sangre, la cual se encarga de distribuirlas tanto a células circunvecinas como distantes; y los *neurotransmisores* que se liberan a través de una abertura muy estrecha (la *hendidura sináptica*) entre una región especializada de una neurona y su blanco (véase la tabla 37-1). Este capítulo se ocupa de las hormonas endocrinas y locales llamadas *prostaglandinas*. Aprenderás más acerca de los neurotransmisores en el capítulo 38.

37.2 ¿QUÉ CARACTERÍSTICAS TIENEN LAS HORMONAS ANIMALES?

Las hormonas locales se difunden hacia las células blanco adyacentes

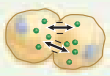
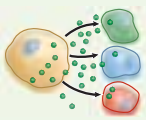
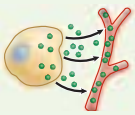
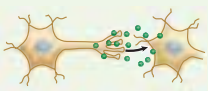
La mayoría de las células secretan **hormonas locales** hacia sus inmediaciones; por ejemplo, las citocinas descritas en el capítulo 36 permiten que las células inmunitarias se comuniquen. Las **prostaglandinas**, ácidos grasos modificados que se sintetizan a partir de los fosfolípidos de las membranas, son otro tipo de hormonas locales (véase más adelante la tabla 37-2). A diferencia de casi todas las demás hormonas, que son sintetizadas por un limitado número de células especializadas, las prostaglandinas son producidas por células de todo el cuerpo. La investigación sobre este grupo diverso y potente de compuestos aún se encuentra en sus etapas iniciales; sólo se conocen algunas prostaglandinas y muchas más aún están en espera de ser descubiertas. Los investigadores descubrieron una prostaglandina que causa constricción de las arterias en el cordón umbilical durante el nacimiento, de manera que el sangrado se detiene. Otra prostaglandina trabaja en conjunción con la oxitocina durante el parto para estimular las contracciones uterinas. Algunas prostaglandinas contribuyen a la inflamación (como ocurre en las articulaciones con artritis) y estimulan a los receptores del dolor. Medicamentos como la aspirina y el ibuprofeno brindan alivio a estos síntomas al bloquear las enzimas que conducen a la síntesis de prostaglandinas. El uso de hormonas locales como las prostaglandinas para comunicarse con células circunvecinas se llama *comunicación paracrina* (el prefijo "para" significa "junto"), mientras que la *comunicación endocrina* ("endo" significa "interno") utiliza químicos que viajan por el torrente sanguíneo, a menudo considerables distancias.

El torrente sanguíneo transporta las hormonas del sistema endocrino

Las **hormonas endocrinas** son mensajes químicos producidos por células especializadas; a menudo se liberan en respuesta a algunos estímulos provenientes del interior o del exterior del cuerpo. Hay tres clases de hormonas endocrinas en los vertebrados (tabla 37-2): **hormonas peptídicas**, formadas de cadenas de aminoácidos; **hormonas derivadas de aminoácidos**, las cuales se sintetizan a partir de uno o dos aminoácidos; y **hormonas esteroides**, que se parecen al colesterol, a partir del cual se sintetizan casi todas las hormonas esteroides.

El sistema endocrino transporta las hormonas endocrinas, las cuales influyen en células blanco que llevan receptores específicos para ellas. Los cambios inducidos por los mensajes

Tabla 37-1 Cómo se comunican las células

Comunicación	Mensajeros químicos	Mecanismo de transmisión	Ejemplos
Directa 	Iones, moléculas pequeñas	Movimiento directo a través de uniones abiertas que vinculan el citosol de células adyacentes	Iones que fluyen entre las células del músculo cardiaco
Paracrina 	Hormonas locales	Difusión a través del líquido intersticial a las células circunvecinas que llevan receptores	Prostaglandinas
Endocrina 	Hormonas	Se transportan en el torrente sanguíneo a células cercanas o distantes que llevan consigo receptores	Insulina
Sináptica 	Neurotransmisores	Difusión de una neurona a través de un espacio estrecho (hendidura sináptica) a una célula que porta receptores	Acetilcolina

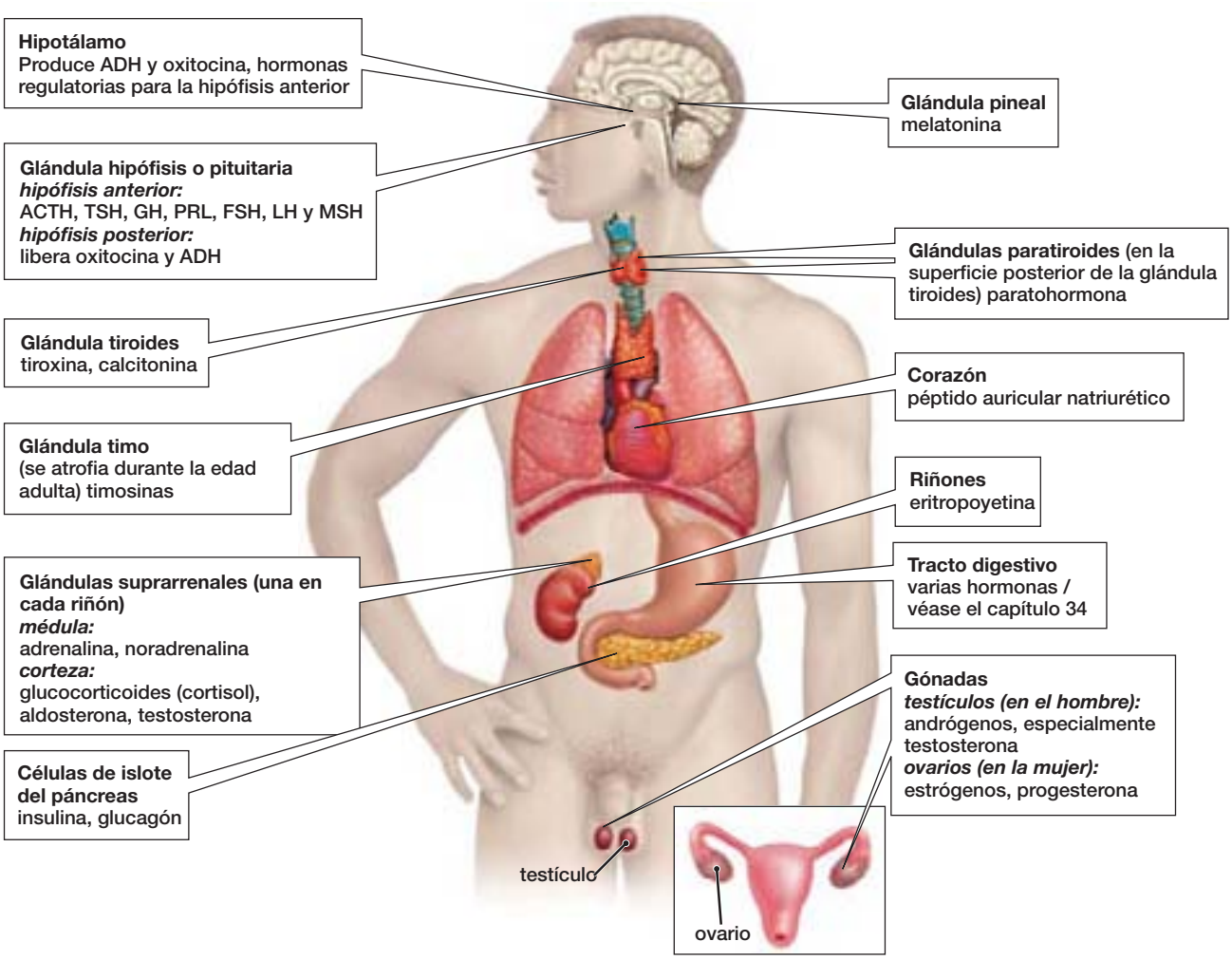


FIGURA 37-1 Principales glándulas endocrinas de los mamíferos y sus secreciones

hormonales pueden ser duraderos e irreversibles, como los que ocurren en la pubertad, o durante la metamorfosis de un renacuajo a una rana, o de una oruga a una mariposa. Lo más común es que los cambios inducidos sean transitorios y reversibles y ayuden a controlar y regular los sistemas fisiológicos que constituyen el cuerpo animal. La regulación del cuerpo requiere comunicación; en el organismo animal, las hormonas se encargan de buena parte de esa comunicación. De hecho, podría decirse que el **sistema endocrino** (que consiste en las hormonas y las diversas células que las secretan y reciben) es el "servicio postal de la fisiología", pues lleva información e instrucciones entre células que están a cierta distancia unas de otras. Las principales glándulas endocrinas de los mamíferos se ilustran en el cuerpo humano de la FIGURA 37-1.

Las hormonas se unen a receptores específicos en las células blanco

camente sobre ciertas **células blanco**, las cuales tienen receptores para moléculas hormonales específicas; las células que carecen de los receptores apropiados no responden al mensaje hormonal (FIGURA 37-2). Además, una hormona determinada podría tener varios efectos distintos, dependiendo de la naturaleza del receptor en la célula blanco con la que entra en contacto. Los receptores hormonales se encuentran en dos lugares generales de las células blanco: en la membrana plasmática y en el interior de la célula, dentro del citosol o del núcleo.

Muchas hormonas derivadas de péptidos y aminoácidos son solubles en agua, pero no en lípidos. Por ello, tales hormonas no pueden penetrar la bicapa fosfolipídica de la membrana plasmática. En vez de ello, la mayoría de estas hormonas se unen a los receptores en la membrana plasmática de la célula blanco (FIGURA 37-3). Estos *receptores de membrana* son grandes proteínas que se extienden de un lado a otro de la membrana plasmática, por lo que una hormona que se une a la porción exterior del receptor puede hacer que cambie de forma la parte de esa proteína que penetra en la célula. Esta transformación física desencadena reacciones (comenzando

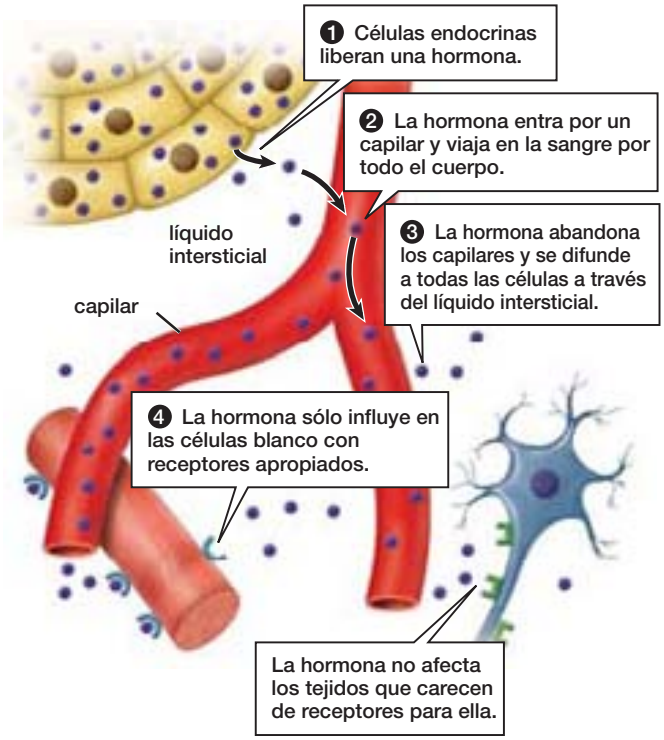
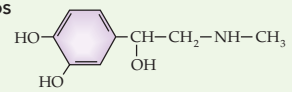
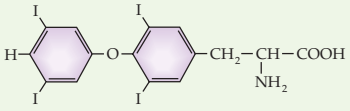
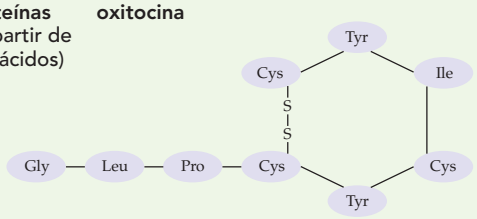
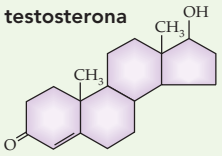
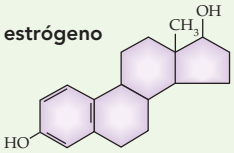
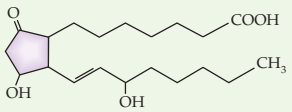

1 Células endocrinas liberan una hormona.
2 La hormona entra por un capilar y viaja en la sangre por todo el cuerpo.
3 La hormona abandona los capilares y se difunde a todas las células a través del líquido intersticial.
líquido intersticial
capilar
4 La hormona sólo influye en las células blanco con receptores apropiados.
La hormona no afecta los tejidos que carecen de receptores para ella.

FIGURA 37-2 **Una hormona llega a su destino**

con una molécula llamada *proteína G* asociada con el receptor) que generan una molécula, la cual constituye un **segundo mensajero** dentro de la célula. El segundo mensajero transfiere la señal del primer mensajero (la hormona) a otras moléculas dentro de la célula, a menudo iniciando una serie de reacciones bioquímicas (véase la figura 37-3). Aunque una variedad de moléculas pueden actuar como segundos mensajeros, en muchos casos, la unión entre las hormonas y los receptores hace que el ATP se convierta en **AMP cíclico** (*cAMP*), un nucleótido que regula muchas actividades celulares (véase el capítulo 3). El AMP cíclico actúa como segundo mensajero e inicia una cadena de reacciones dentro de la célula. En cada reacción de la cadena interviene un número cada vez mayor de moléculas, lo que amplifica la señal original. El resultado final varía dependiendo de la célula blanco: se podrían abrir canales en la membrana plasmática, o se podrían sintetizar o secretar sustancias. Por ejemplo, la hormona *adrenalina* (también llamada *epinefrina*) se une a receptores de membrana del músculo cardiaco, activa la formación de cAMP e inicia una serie de sucesos moleculares que provocan contracciones más fuertes en el músculo cardiaco. Ésta es una de varias formas en que la adrenalina ayuda al cuerpo a prepararse para situaciones de emergencia, como veremos más adelante en este capítulo.

En contraste, las hormonas esteroides son solubles en lípidos y, por lo tanto, pueden difundirse a través de las membranas celulares y unirse a los receptores dentro de la célula, ya sea en el citosol o en el núcleo. Una vez dentro de una hormona esteroide, estos receptores actúan regulando la actividad de los genes. Algunos receptores de hormonas esteroides están en el núcleo; otros esperan en el citosol, donde se unen a la hormona y la transportan al interior del núcleo. Una vez en el núcleo, el complejo receptor-hormona se une al DNA y estimula genes específicos para que transcriban RNA mensajero, el cual se desplaza al citosol y dirige la síntesis de una

Tabla 37-2 La diversidad química de las hormonas de los vertebrados

Tipo de compuesto	Ejemplos
Derivados de los aminoácidos (sintetizados a partir de uno o dos aminoácidos)	**noradrenalina**  **tiroxina** 
Péptidos y proteínas (sintetizados a partir de múltiples aminoácidos)	**oxitocina** 
Esteroides (sintetizados a partir del colesterol)	**testosterona**  **estrógeno** 
Prostaglandinas (sintetizadas a partir de ácidos grasos)	**prostaglandina E_1** 

proteína (**FIGURA 37-4**). Por ejemplo, en las gallinas, el estrógeno —una hormona esteroide— promueve la transcripción del gen de la albúmina que hace que se sintetice albúmina (proteína de la clara de huevo), la cual se incluye en el huevo para alimentar al pollito en desarrollo. Las hormonas esteroides podrían tardar minutos o incluso días en ejercer plenamente sus efectos. Algunos investigadores también han encontrado receptores para hormonas esteroides en la membrana plasmática; estos receptores confieren gran versatilidad a los esteroides en cuanto a sus mecanismos de transmisión de señales.

Mecanismos de retroalimentación regulan la liberación de hormonas

Para que una hormona sirva como control fisiológico, debe haber alguna forma de activar y apagar su mensaje. En los animales, el "interruptor" generalmente implica una retroalimentación negativa: la secreción de una hormona estimula una respuesta en las células blanco y esa respuesta inhibe la secreción ulterior de la hormona. Casi todas las hormonas ejercen efectos tan potentes sobre el cuerpo que serían perjudiciales si actuaran durante demasiado tiempo; por ello, el

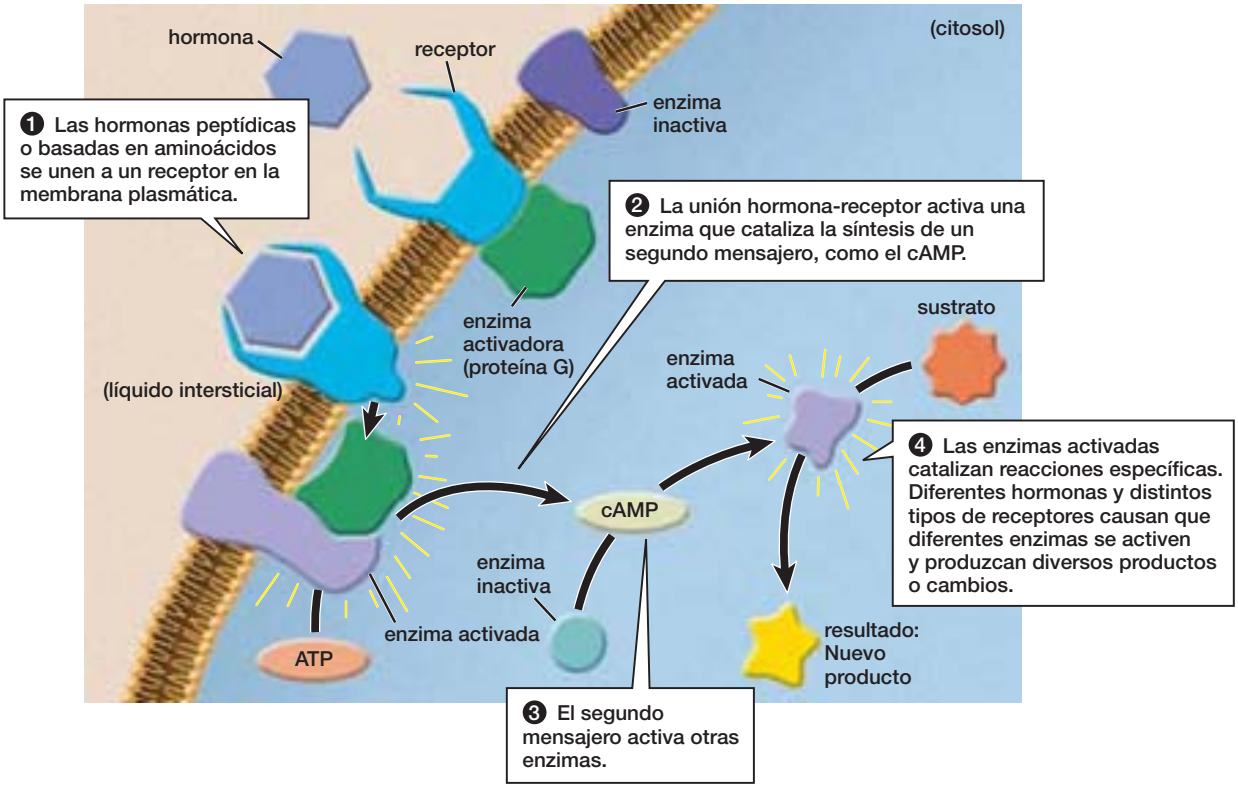

hormona
receptor
(citosol)
enzima inactiva
❶ Las hormonas peptídicas o basadas en aminoácidos se unen a un receptor en la membrana plasmática.
❷ La unión hormona-receptor activa una enzima que cataliza la síntesis de un segundo mensajero, como el cAMP.
sustrato
enzima activadora (proteína G)
enzima activada
(líquido intersticial)
❹ Las enzimas activadas catalizan reacciones específicas. Diferentes hormonas y distintos tipos de receptores causan que diferentes enzimas se activen y produzcan diversos productos o cambios.
cAMP
enzima inactiva
enzima activada
ATP
resultado: Nuevo producto
❸ El segundo mensajero activa otras enzimas.

FIGURA 37-3 Cómo influyen las hormonas derivadas de péptidos o aminoácidos en las células blanco

control de la liberación hormonal mediante retroalimentación negativa tiene importancia especial. Supongamos que una persona acaba de trotar varios kilómetros en un día soleado y caluroso y perdió medio litro de agua por la transpiración. Como respuesta, la glándula hipófisis libera *hormona antidiurética* (ADH), la cual hace que los riñones reabsorban más agua y produzcan orina muy concentrada (véase el capítulo 35). Pero si esta persona llega a casa y bebe un litro de Gatorade®, repondrá con creces el agua que perdió al sudar. La retención continuada de esta agua en exceso podría elevar la presión arterial y posiblemente dañar al corazón. La retroalimentación negativa hace que la secreción de ADH se suspenda cuando el contenido de agua de la sangre regresa a la normalidad, lo que permite que los riñones comiencen a eli-

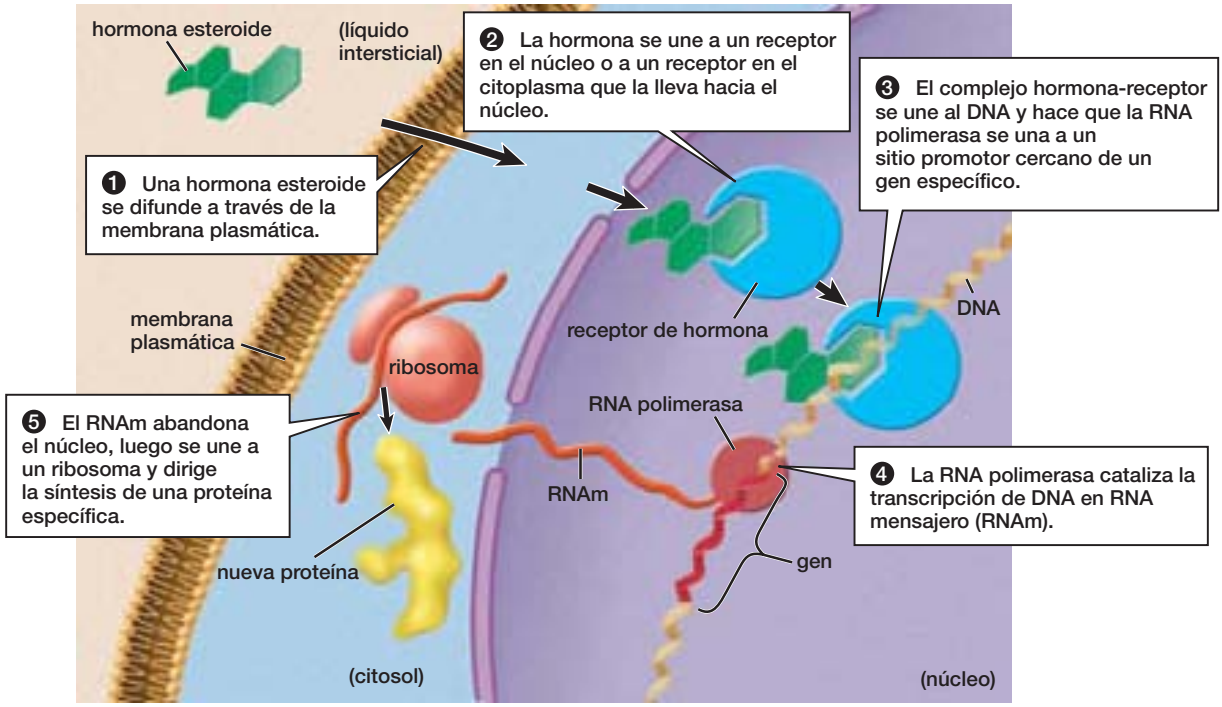

hormona esteroide
(líquido intersticial)
❷ La hormona se une a un receptor en el núcleo o a un receptor en el citoplasma que la lleva hacia el núcleo.
❸ El complejo hormona-receptor se une al DNA y hace que la RNA polimerasa se una a un sitio promotor cercano de un gen específico.
❶ Una hormona esteroide se difunde a través de la membrana plasmática.
DNA
membrana plasmática
receptor de hormona
ribosoma
RNA polimerasa
❺ El RNAm abandona el núcleo, luego se une a un ribosoma y dirige la síntesis de una proteína específica.
RNAm
❹ La RNA polimerasa cataliza la transcripción de DNA en RNA mensajero (RNAm).
nueva proteína
gen
(citosol)
(núcleo)

FIGURA 37-4 Hormonas esteroides que influyen en las células blanco

minar el agua excedente. Busca más ejemplos de retroalimentación negativa mientras lees el capítulo.

En unos cuantos casos, la liberación de una hormona se controla por retroalimentación positiva, al menos por un breve lapso. Por ejemplo, como vimos en el capítulo 31, las contracciones del útero al principio del parto hacen que el cuello de la matriz se distienda y que la hipófisis posterior libere la hormona **oxitocina**, la cual, a la vez, estimula contracciones más fuertes del útero, lo que provoca que se libere más oxitocina, creando un ciclo de retroalimentación positiva. De manera simultánea, la oxitocina hace que las células del útero liberen prostaglandinas, que intensifican aún más las contracciones uterinas. Este mecanismo es otro ejemplo de retroalimentación positiva. Pero los sistemas de retroalimentación positiva deben producir retroalimentación negativa que limite su duración. En este caso, las contracciones del útero hacen que el bebé nazca, lo que pone fin al estiramiento del cuello de la matriz y detiene el ciclo de retroalimentación positiva que propició e intensificó las contracciones uterinas.

Las hormonas endocrinas de vertebrados e invertebrados tienen asombrosas similitudes

Aunque los invertebrados constituyen aproximadamente el 95 por ciento de todas las especies sobre la Tierra, sus hormonas no se conocen tan bien como las de los vertebrados. Una razón es que los ciclos de vida de los invertebrados y, por consiguiente, las hormonas que los regulan son mucho más diversos que los de los vertebrados. Sin embargo, los investigadores descubrieron que los invertebrados tienen tanto hormonas peptídicas como esteroides que utilizan los mecanismos de comunicación básica descritos con anterioridad. Por ejemplo, los científicos encontraron estrógeno y testosterona en los caracoles; al parecer, estas hormonas regulan la diferenciación sexual conforme los animales se desarrollan, al igual que en los seres humanos. Esto hace de los caracoles un blanco para los contaminantes conocidos como perturbadores endocrinos, como se describe en "Guardián de la Tierra: Engaño endocrino".

Una hormona esteroide controla el proceso de muda en los insectos

Las hormonas de los insectos se han estudiado relativamente a profundidad por su potencial uso en el control de las plagas. Los insectos tienen un esqueleto externo que les sirve de sostén y que está compuesto de cutícula inerme y rígida que deben mudar periódicamente para poder crecer. La muda es controlada por la hormona esteroide **ecdisona**, a menudo conocida como la *hormona de la muda*. Al igual que muchas hormonas esteroides de los vertebrados, la ecdisona actúa sobre los receptores localizados dentro del núcleo y afecta la transcripción de genes. A medida que la antigua cutícula se vuelve más apretada, células sensoriales estimulan la liberación de una hormona que, a la vez, estimula la secreción de ecdisona. Como ocurre con las hormonas de los vertebrados, la ecdisona afecta las células en todo el cuerpo del insecto. De esta forma se inicia un complejo proceso en el que las células epiteliales se desprenden de la antigua cutícula y secretan cutícula nueva y suave debajo de la anterior. El insecto expande su cuerpo llenándose de aire. Esto abre la antigua cutícula y extiende la nueva para dar espacio al crecimiento ulterior. Conforme el insecto emerge, deja atrás la cutícula con la forma de su cuerpo ( ). Los investigadores han aprovechado su conocimiento de este proceso para elaborar pesticidas que son selectivos para los insectos y bastante menos tóxicos para los vertebrados que muchos de los venenos que comúnmente se riegan en los cultivos. Estos nuevos insecticidas se unen de forma permanente a los receptores de ecdisona, estimulándolos y haciendo que los insectos larvarios muden de exoesqueleto prematuramente y mueran.

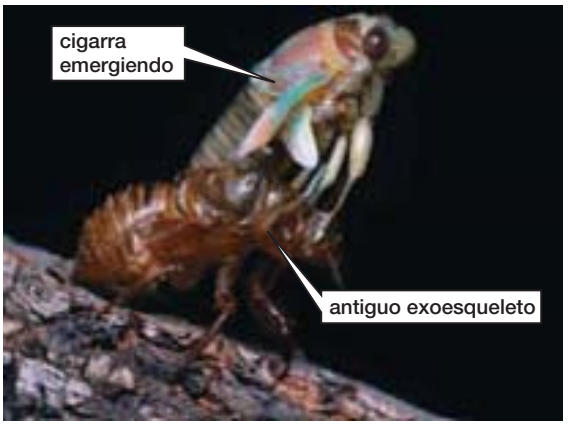


FIGURA 37-5 Insecto en proceso de muda
Una pálida cigarra emerge de su escudo de cutícula.

37.3 ¿QUÉ ESTRUCTURAS Y HORMONAS CONSTITUYEN EL SISTEMA ENDOCRINO DE LOS MAMÍFEROS?

Los endocrinólogos no saben cabalmente cómo funcionan las hormonas animales. Casi cada año se descubren nuevas hormonas, así como nuevas funciones de hormonas conocidas. No obstante, las funciones clave de las principales glándulas y órganos endocrinos se conocen desde hace muchos años. Aquí nos enfocaremos en las funciones endocrinas del complejo hipotálamo-hipófisis, las glándulas tiroides y paratiroides, el páncreas, los órganos sexuales y las glándulas suprarrenales (véase la figura 37-1). En la **tabla 37-3** se mencionan éstas y otras glándulas, sus principales hormonas y sus funciones más importantes.

Los mamíferos tienen glándulas tanto exocrinas como endocrinas

Existen dos tipos básicos de glándulas: exocrinas y endocrinas. Las **glándulas exocrinas** producen secreciones que se liberan hacia el exterior del cuerpo ("exo" significa "afuera" en griego) o en el tracto digestivo (un tubo hueco que es continuo con el mundo exterior). Las secreciones de estas glándulas se liberan a través de tubos o aberturas llamadas **conductos**. Entre las glándulas exocrinas están las glándulas sudoríparas y sebáceas (que producen aceites) de la piel, las glándulas lacrimales (que secretan lágrimas), las glándulas mamarias (que producen leche) y las glándulas que producen secreciones digestivas, como las salivales y algunas células del páncreas.

Las **glándulas endocrinas**, también llamadas *glándulas sin conductos*, liberan sus hormonas dentro del cuerpo ("endo" significa "adentro" en griego). Una glándula endocrina por lo regular consiste en cúmulos de células productoras de hormo-

Tabla 37-3 Principales glándulas endocrinas y hormonas de los mamíferos

Glándula endocrina	Hormona	Tipo de compuesto	Función principal
Hipotálamo (a la hipófisis anterior)	Hormonas liberadoras e inhibidoras	Péptidos	Al menos nueve hormonas; las liberadoras estimulan la liberación de hormonas de la hipófisis anterior; las inhibidoras inhiben la liberación de hormonas de la hipófisis anterior.
Hipófisis anterior	Hormona estimuladora de folículos (FSH)	Péptidos	En la *hembra*, estimula el crecimiento del folículo, la secreción de estrógeno y quizá la ovulación; en el *macho* estimula la espermatogénesis.
	Hormona luteinizante (LH)	Péptido	En la *hembra*, estimula la ovulación, el crecimiento del cuerpo lúteo y la secreción de estrógeno y progesterona; en el *macho* estimula la secreción de testosterona.
	Hormona estimuladora de la tiroides (TSH)	Péptido	Estimula a la tiroides para que libere tiroxina.
	Hormona adrenocorticotrópica (ACTH)	Péptido	Estimula a la corteza suprarrenal para que libere hormonas, especialmente glucocorticoides, como el cortisol.
	Hormona del crecimiento (GH)	Péptido	Estimula el crecimiento, la síntesis de proteínas y el metabolismo de las grasas; inhibe el metabolismo de los azúcares.
	Prolactina (PRL)	Péptido	Estimula la síntesis de leche y su secreción de las glándulas mamarias.
	Hormona estimuladora de melanocitos (MSH)	Péptido	Promueve la síntesis del pigmento marrón de la piel, la melanina.
Hipotálamo (vía la hipófisis posterior)	Hormona antidiurética (ADH)	Péptido	Promueve la reabsorción de agua de los riñones; constriñe las arteriolas.
	Oxitocina	Péptido	En la *hembra* estimula la contracción de los músculos uterinos durante el parto, la expulsión de la leche y comportamientos maternos; en el *macho* facilita la eyaculación o expulsión del semen.
Tiroides	Tiroxina	Derivado de aminoácido	Eleva la tasa metabólica de la mayor parte de las células del cuerpo; eleva la temperatura corporal; regula el crecimiento y el desarrollo.
Paratiroides	Paratohormona	Péptido	Estimula la liberación de calcio de los huesos; promueve la absorción de calcio en los intestinos y la reabsorción de calcio en los riñones.
Páncreas	Insulina	Péptido	Reduce los niveles de glucosa en la sangre, aumentando la absorción de glucosa por las células y su conversión a glucógeno, sobre todo en el hígado; regula el metabolismo de las grasas.
	Glucagón	Péptido	Convierte glucógeno en glucosa, lo que eleva los niveles de glucosa en la sangre.
Ovarios[a]	Estrógeno	Esteroide	Causa el desarrollo de las características sexuales femeninas secundarias y la maduración de los óvulos; promueve el crecimiento del revestimiento uterino.
	Progesterona	Esteroide	Estimula el desarrollo del revestimiento uterino y la formación de la placenta.
Testículos[a]	Testosterona	Esteroide	Estimula el desarrollo de los genitales y las características sexuales secundarias del macho; estimula la espermatogénesis.
Médula suprarrenal	Adrenalina (epinefrina) y noradrenalina (norepinefrina)	Derivados de aminoácidos	Eleva los niveles de azúcar y ácidos grasos en la sangre; eleva la tasa metabólica; aumenta el ritmo y la intensidad de las contracciones del corazón; constriñe algunos vasos sanguíneos.
Corteza suprarrenal	Glucocorticoides (cortisol)	Esteroide	Eleva el azúcar en la sangre; regula el metabolismo de azúcares y grasas; efectos antiinflamatorios.
	Aldosterona	Esteroide	Aumenta la reabsorción de sal en los riñones.
	Testosterona	Esteroide	Causa masculinización de las partes del cuerpo; influye en el crecimiento.
		Otras fuentes de hormonas	
Glándula pineal	Melatonina	Derivado de aminoácido	Regula los ciclos reproductivos estacionales y los ciclos de sueño-vigilia; podría regular la aparición de la pubertad.
Timo	Timosina	Péptido	Estimula la maduración de células del sistema inmunitario.
Riñón	Renina	Péptido	Actúa sobre proteínas de la sangre para producir una hormona (angiotensina) que regula la presión arterial.
	Eritropoyetina	Péptido	Estimula la síntesis de glóbulos rojos en la médula ósea.
Corazón	Péptido auricular natriurético (ANP)	Péptido	Incrementa la excreción de sal y agua por los riñones; reduce la presión arterial.
Tracto digestivo[b]	Secretina, gastrina, colecistocinina y otras	Péptidos	Controlan la secreción de moco, enzimas y sales en el tracto digestivo; regulan el peristaltismo.
Células grasas	Leptina	Péptido	Regula el apetito; estimula la función inmunitaria; promueve el crecimiento de vasos sanguíneos; es necesaria para que inicie la pubertad.

[a] Véase los capítulos 40 y 41.

[b] Véase el capítulo 34.

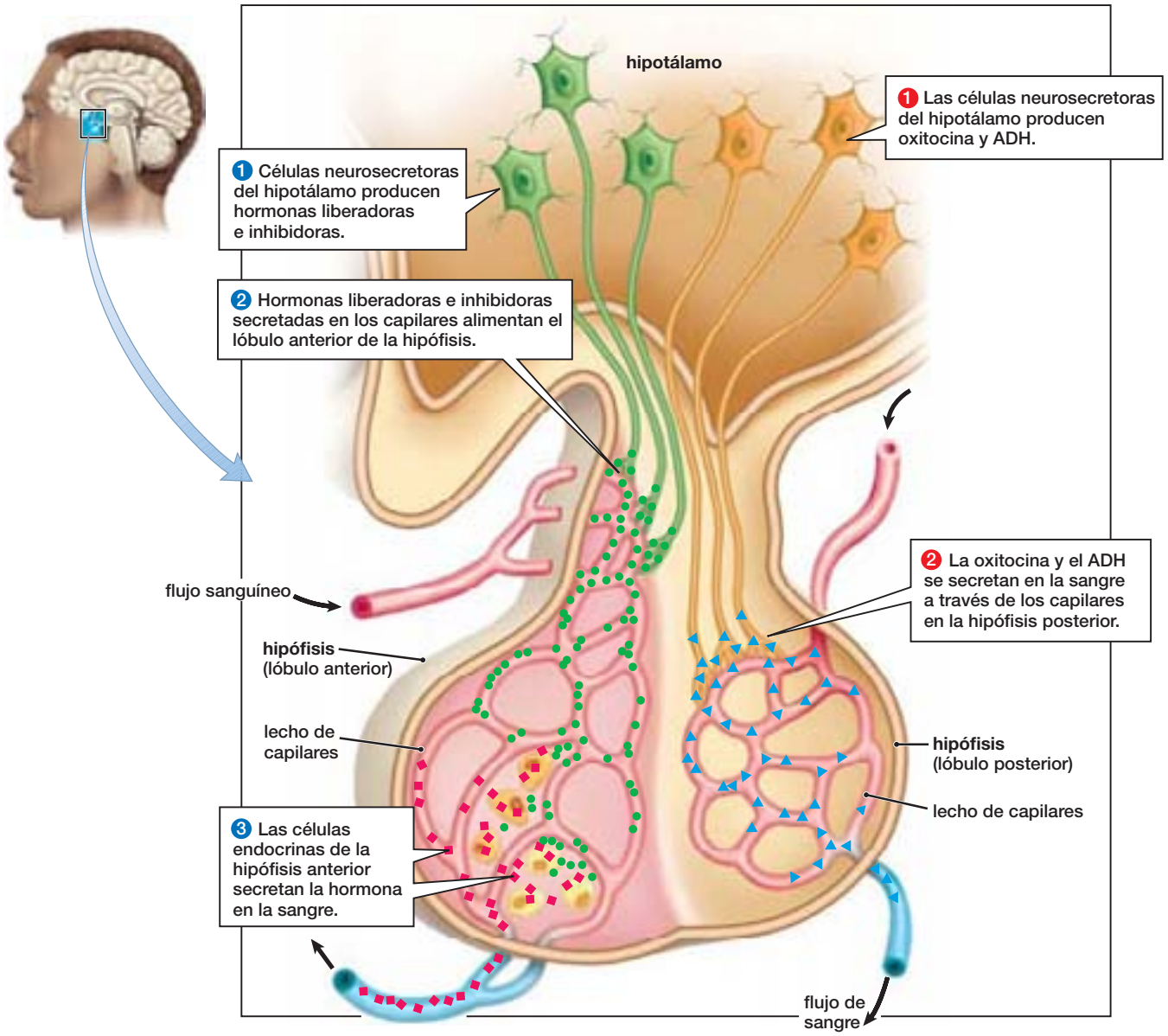

hipotálamo
1 Las células neurosecretoras del hipotálamo producen oxitocina y ADH.
1 Células neurosecretoras del hipotálamo producen hormonas liberadoras e inhibidoras.
2 Hormonas liberadoras e inhibidoras secretadas en los capilares alimentan el lóbulo anterior de la hipófisis.
2 La oxitocina y el ADH se secretan en la sangre a través de los capilares en la hipófisis posterior.
flujo sanguíneo
hipófisis (lóbulo anterior)
lecho de capilares
hipófisis (lóbulo posterior)
lecho de capilares
3 Las células endocrinas de la hipófisis anterior secretan la hormona en la sangre.
flujo de sangre

FIGURA 37-6 El hipotálamo controla la hipófisis o pituitaria
Las células neurosecretoras del hipotálamo controlan la liberación de hormonas en el lóbulo anterior de la hipófisis (también llamada pituitaria) produciendo hormonas liberadoras o inhibidoras (izquierda). Estas células secretan sus hormonas a una red de capilares que las lleva a la hipófisis anterior. Ahí cada hormona estimula a las células endocrinas que poseen los receptores apropiados, pero sin afectar otros tipos de células. El lóbulo posterior de la hipófisis (derecha) es una extensión del hipotálamo, por lo que se le conoce como neurohipófisis. Las células neurosecretoras del hipotálamo tienen terminaciones en un lecho capilar del lóbulo posterior de la hipófisis, donde liberan oxitocina y hormona antidiurética (ADH). PREGUNTA: ¿Qué ventaja se obtiene al tener células nerviosas en el hipotálamo que participan en el control de la liberación de hormonas de la hipófisis?

nas incrustados en una red de capilares. Las células secretan sus hormonas al líquido intersticial que rodea a los capilares (véase la figura 37-2). Luego, las hormonas entran en los capilares por difusión y el torrente sanguíneo las transporta por todo el cuerpo. Nos enfocaremos en las glándulas endocrinas en el resto de este capítulo.

El hipotálamo controla las secreciones de la glándula hipófisis

Si el sistema endocrino es el servicio postal del cuerpo, el hipotálamo es la oficina central de correos. Juntas, estas estructuras coordinan la acción de muchos sistemas de mensajes hormonales clave. El **hipotálamo** es una parte del cerebro que contiene cúmulos de células nerviosas especializadas llamadas **células neurosecretoras**, las cuales sintetizan hormonas peptídicas, las almacenan y las liberan cuando reciben un estímulo. La **glándula hipófisis** (o pituitaria) es una glándula del tamaño de un chícharo que cuelga del hipotálamo por un tallo. La hipófisis consta de dos partes distintas: la **hipófisis anterior (adenohipófisis)** y la **hipófisis posterior (neurohipófisis)** (FIGURA 37-6). El hipotálamo controla la liberación de hormonas de ambas partes. La hipófisis anterior es una verdadera glándula endocrina, integrada por varios tipos de células secretoras de hormonas envueltas por una red de capilares.

a)

b)

FIGURA 37-7 La hormona del crecimiento tiene efectos en el cuerpo

a) La insuficiencia de la hormona del crecimiento, o una falta de receptores funcionales para ella, genera un tipo de enanismo. A mediados del siglo XIX "Pulgarcito" (Charles Stratton), quien alcanzó una estatura como adulto de 84 centímetros, fue todo un éxito en el circo de Barnum y Bailey. Aquí aparece al lado de P. T. Barnum. ***b)*** Demasiada hormona del crecimiento provoca gigantismo, como en el caso de Robert Wadlow, quien alcanzó una estatura de 2.72 metros. Wadlow aparece aquí con sus dos hermanos menores, quienes no sufrieron este trastorno. PREGUNTA: ¿Por qué el gigantismo por lo regular es más difícil de tratar que el enanismo?

La hipófisis posterior, en cambio, consiste principalmente en una red de capilares y las terminaciones de células neurosecretoras cuyos cuerpos celulares se encuentran en el hipotálamo.

Las hormonas hipotalámicas controlan a la hipófisis anterior

Las células neurosecretoras del hipotálamo producen por lo menos nueve hormonas peptídicas que regulan la liberación de hormonas de la hipófisis anterior. Estos péptidos se denominan **hormonas liberadoras** u **hormonas inhibidoras**, dependiendo de si estimulan o evitan la liberación de hormonas de la hipófisis, respectivamente. Las hormonas liberadoras e inhibidoras se sintetizan en las células nerviosas del hipotálamo, se secretan a un lecho de capilares en el tallo que conecta el hipotálamo con la hipófisis y viajan una distancia corta a través de vasos sanguíneos a un segundo lecho de capilares que rodea las células endocrinas de la hipófisis anterior. Ahí, las hormonas liberadoras e inhibidoras salen de los capilares por difusión e influyen en la secreción de hormonas hipofisiarias.

Puesto que las hormonas liberadoras e inhibidoras se secretan muy cerca de la hipófisis anterior, se producen en muy pequeñas cantidades. Por ello, no debe extrañarnos que haya sido muy difícil aislarlas y estudiarlas. Andrew Schally y Roger Guillemin, endocrinólogos estadounidenses que compartieron el Premio Nobel de Medicina en 1977 por caracterizar varias de esas hormonas, usaron el cerebro de millones de ovejas y cerdos (obtenidos de los mataderos) para extraer una cantidad suficiente de hormona liberadora y analizarla químicamente.

La hipófisis anterior produce y libera diversas hormonas

La hipófisis anterior produce varias hormonas peptídicas. Cuatro de ellas regulan la producción de hormonas en otras glándulas endocrinas. La **hormona estimuladora del folículo (FSH)** y la **hormona luteinizante (LH)** estimulan la producción de espermatozoides y testosterona en el macho, y de óvulos, estrógeno y progesterona en la hembra. Estudiaremos los papeles de la FSH y la LH más a fondo en el capítulo 40. La **hormona estimuladora de la tiroides (TSH)** estimula a la glándula tiroides para que libere sus hormonas, y la **hormona adrenocorticotrópica (ACTH)** (el nombre significa "hormona que estimula la corteza suprarrenal") hace que se libere la hormona *cortisol* de la corteza suprarrenal, como se explicará más adelante.

Las demás hormonas de la hipófisis anterior no actúan sobre otras glándulas endocrinas. La **prolactina**, junto con otras hormonas, estimula el desarrollo de las glándulas mamarias (que son glándulas exocrinas dentro de las mamas y que producen leche) durante el embarazo. La **hormona estimuladora de melanocitos (MSH)** estimula la síntesis del pigmento cutáneo melanina. La **hormona del crecimiento** regula el crecimiento del cuerpo actuando sobre casi todas sus células: incrementa la síntesis de proteínas, el aprovechamiento de las grasas y el almacenamiento de carbohidratos. A medida que un vertebrado madura, la hormona del crecimiento tiene un efecto estimulante sobre el crecimiento de los huesos, lo cual influye sobre el tamaño final del organismo adulto. Gran parte de la variación normal en la estatura humana se debe a diferencias en la secreción de hormona del crecimiento por la hipófisis anterior. Una insuficiencia de hormona del crecimiento —o receptores defectuosos para ella— causa algunos casos de *enanismo;* un exceso puede causar *gigantismo* (**FIGURA 37-7**). Aunque en la edad adulta muchos huesos pierden su capacidad para alargarse, se sigue secretando hormona del crecimiento durante toda la vida, pues ayuda a regular el metabolismo de proteínas, grasas y azúcares.

Un importante adelanto en el tratamiento del enanismo hipofisiario se dio cuando ciertos biólogos moleculares lograron insertar el gen de la hormona humana del crecimiento en bacterias, que produjeron grandes cantidades de la sustancia. Antes, la principal fuente comercial de hormona del crecimiento eran cadáveres humanos, de los cuales se extraían cantidades diminutas a un costo muy elevado. Gracias a la nueva fuente, más económica, muchos más niños con hipófisis poco activa, que en otros tiempos habrían sido muy bajitos, ahora pueden alcanzar una estatura normal. Por eso casi no hay fo-

tografías recientes de personas con este tipo específico de enanismo.

La hipófisis posterior libera hormonas producidas por células del hipotálamo

La hipófisis posterior contiene las terminaciones de dos tipos de células neurosecretoras cuyo cuerpo celular está en el hipotálamo. Tales terminaciones están rodeadas por un lecho de capilares en el que liberan hormonas para ser transportadas por el torrente sanguíneo (véase la figura 37-6). Dos hormonas peptídicas se sintetizan en el hipotálamo y se liberan en la hipófisis posterior: la *hormona antidiurética* (*ADH*) y la *oxitocina*.

La **hormona antidiurética**, cuyo nombre significa literalmente "hormona que impide la micción", ayuda a evitar la deshidratación. Como vimos en el capítulo 35, al aumentar la permeabilidad al agua de los conductos recolectores de las nefronas renales, la ADH hace que se reabsorba agua de la orina y se retenga en el cuerpo. Resulta interesante que el alcohol inhibe la liberación de ADH y aumenta considerablemente la producción de orina, de manera que un bebedor de cerveza en realidad podría deshidratarse.

La oxitocina provoca contracciones de los músculos de la matriz durante el parto. También activa el "reflejo de secreción de leche" en las madres que amamantan, al hacer que los tejidos musculares de las mamas (glándulas mamarias) se contraigan en respuesta a la estimulación que produce el bebé al succionar. Este reflejo expulsa leche de las glándulas productoras, que tienen forma de bolsas, hacia los pezones (FIGURA 37-8).

Estudios recientes con animales de laboratorio indican que la oxitocina también tiene efectos sobre el comportamiento. En las ratas, por ejemplo, inyecciones de oxitocina hacen que hembras vírgenes exhiban una conducta maternal, como construir un nido, lamer las crías de otras hembras y recuperar aquellas que se han alejado del nido. La oxitocina también podría desempeñar un papel en el comportamiento reproductor del macho, al estimular el movimiento de los espermatozoides a través del tracto reproductivo y haciendo que las ratas macho eyaculen más fácilmente.

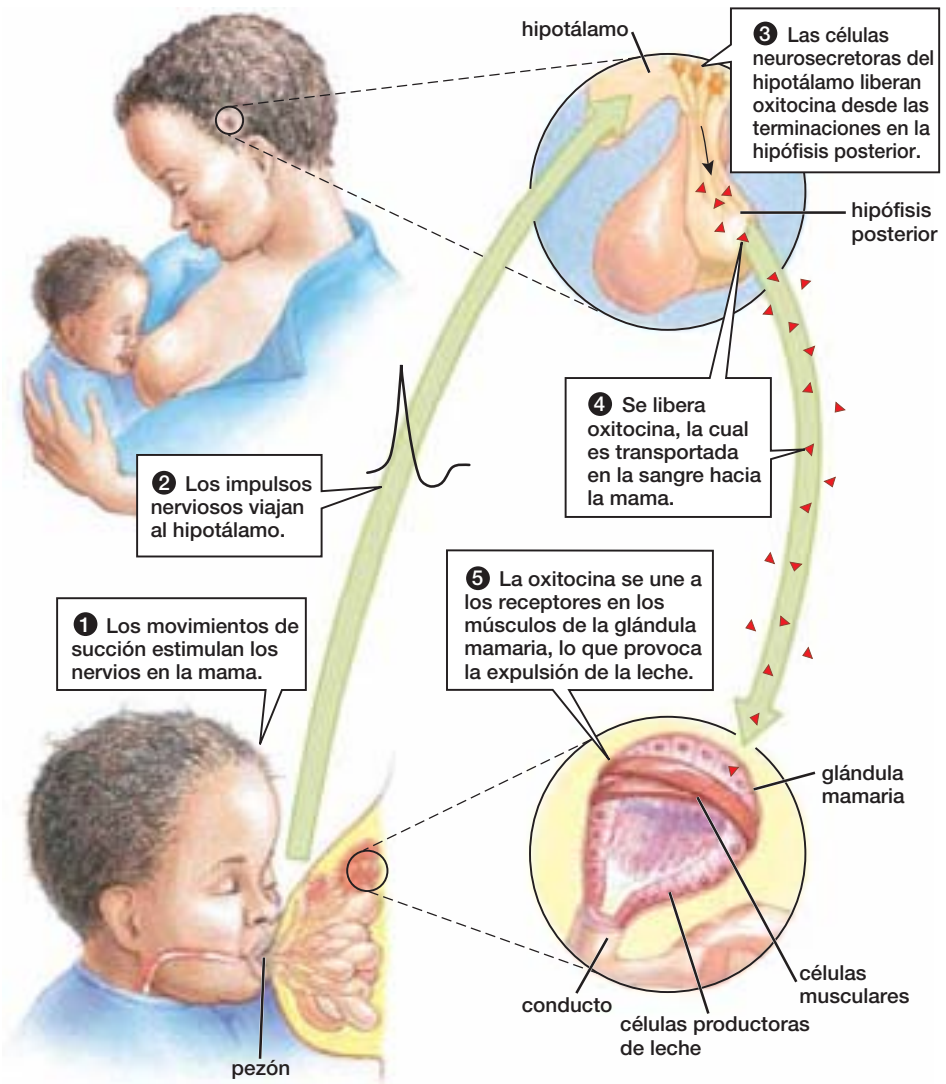

hipotálamo
❸ Las células neurosecretoras del hipotálamo liberan oxitocina desde las terminaciones en la hipófisis posterior.
hipófisis posterior
❹ Se libera oxitocina, la cual es transportada en la sangre hacia la mama.
❷ Los impulsos nerviosos viajan al hipotálamo.
❺ La oxitocina se une a los receptores en los músculos de la glándula mamaria, lo que provoca la expulsión de la leche.
❶ Los movimientos de succión estimulan los nervios en la mama.
glándula mamaria
células musculares
conducto
células productoras de leche
pezón

FIGURA 37-8 Hormonas y lactancia
El control de la secreción de leche por la oxitocina durante la lactancia se regula por retroalimentación entre un bebé y su madre. Este ciclo continúa hasta que el bebé queda satisfecho y deja de succionar. Al cesar la estimulación del pezón, se suspende la liberación de oxitocina, los músculos se relajan y el flujo de leche se interrumpe.

Las glándulas tiroides y paratiroides influyen en el metabolismo y en los niveles de calcio

La **glándula tiroides**, que está en la parte delantera del cuello, situada bajo la laringe (FIGURA 37-9a), produce dos hormonas: *tiroxina* y *calcitonina*. La calcitonina es un péptido importante en la regulación de los niveles de calcio en la sangre en varios tipos de mamíferos, pero parece desempeñar un papel menor en los humanos. En ocasiones se administra como medicamento para reducir la osteoporosis. La **tiroxina**, también llamada hormona tiroidea, es un aminoácido modificado que contiene yodo. Como no puede difundirse a través de las membranas, hay algunas proteínas portadoras que se encargan de introducirla en las células. La tiroxina trabaja uniéndose a los receptores nucleares que regulan la actividad de los genes. Influye en la mayoría de las células del cuerpo, ya que eleva su tasa metabólica y estimula la síntesis de enzimas que descomponen la glucosa y suministran energía. En los adultos, los niveles de tiroxina determinan la tasa metabólica

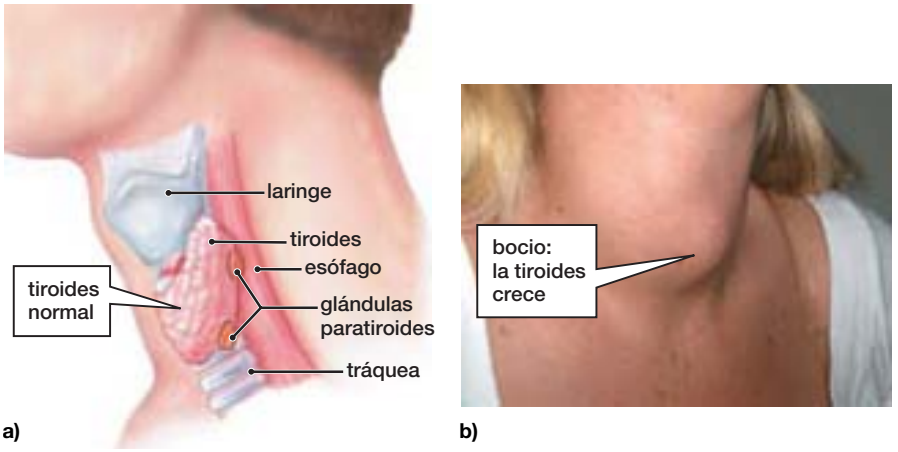


FIGURA 37-9 Las glándulas tiroides y paratiroides
a) La tiroides, que incluye pequeñas glándulas paratiroides, envuelve la parte frontal de la laringe en el cuello. ***b)*** El bocio, una condición en la que la glándula tiroides crece desmesuradamente, se debe a una dieta deficiente en yodo.

general, esto es, la tasa en reposo del metabolismo celular. Se requiere de niveles normales de tiroxina para que la mente esté alerta. Bajos niveles de tiroxina hacen que las personas se sientan cansadas física y mentalmente; podrían perder el apetito, pero aún así engordar; también es posible que se vuelvan menos tolerantes al frío (el cuerpo genera menos calor cuando su tasa metabólica es baja). Un exceso de tiroxina produce nerviosismo e irritabilidad, aumento en el apetito e intolerancia al calor.

En los animales jóvenes, incluidos los seres humanos, la tiroxina ayuda a regular el crecimiento, estimulando tanto la tasa metabólica como el desarrollo del sistema nervioso. Una secreción insuficiente de hormona tiroidea durante la primera infancia causa *cretinismo,* una condición caracterizada por retraso mental y enanismo. Por fortuna, un diagnóstico temprano y complementos de tiroxina pueden revertir esta condición. Por otra parte, una secreción excesiva de tiroxina en los vertebrados en desarrollo puede causar un desarrollo precoz. En 1912, en una de las primeras demostraciones de la acción hormonal, un fisiólogo descubrió que la tiroxina puede inducir una metamorfosis temprana en renacuajos (véase "Conexiones evolutivas: La evolución de las hormonas").

Los niveles de tiroxina en la sangre se regulan mediante retroalimentación negativa. La liberación de tiroxina es estimulada por la hormona estimuladora de la tiroides (TSH), producida por la hipófisis anterior, la cual, a su vez, es estimulada por una hormona liberadora producida por el hipotálamo. La cantidad de TSH liberada por la hipófisis se regula mediante retroalimentación negativa. Niveles adecuados de tiroxina en el torrente sanguíneo inhiben la secreción tanto de la hormona liberadora (del hipotálamo) como de TSH (de la hipófisis anterior); de esta forma se inhibe una liberación ulterior de tiroxina por parte de la glándula tiroides (**FIGURA 37-10**).

Una dieta deficiente en yodo reduce la producción de tiroxina y activa un mecanismo de retroalimentación que trata de restaurar los niveles normales de las hormonas, aumentando drásticamente el número de células productoras de tiroxina. Este mecanismo de compensación produce un crecimiento

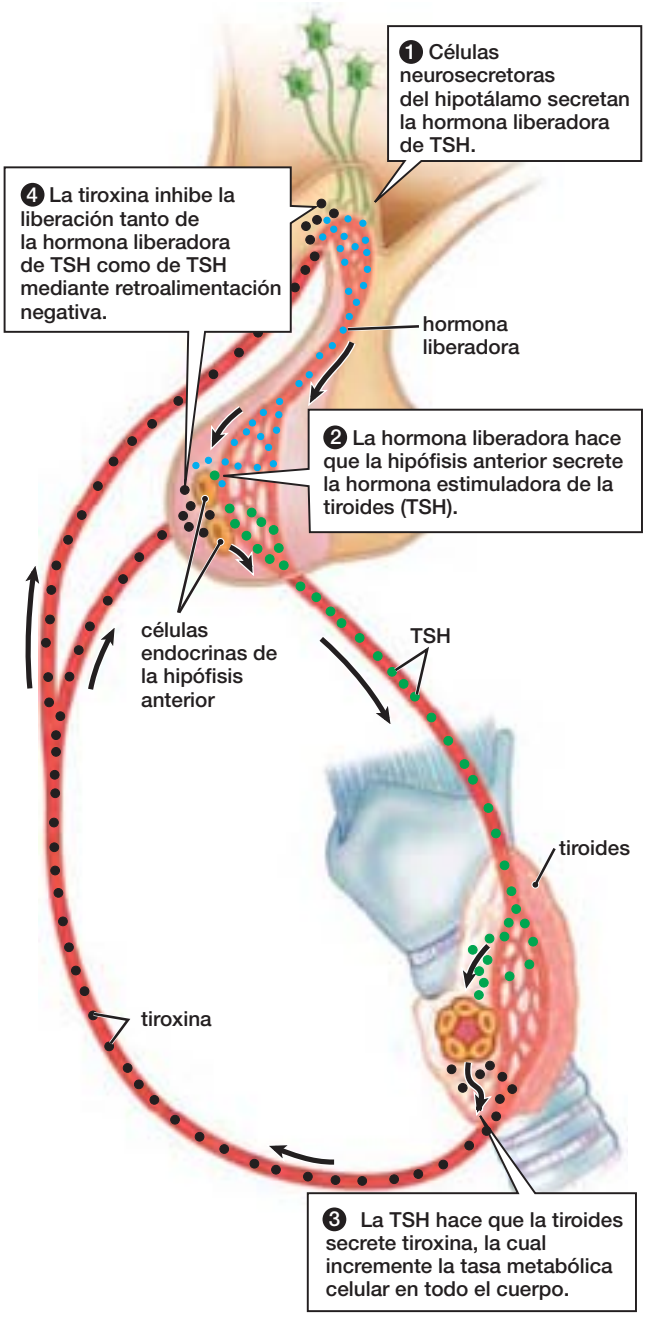

❶ Células neurosecretoras del hipotálamo secretan la hormona liberadora de TSH.
❹ La tiroxina inhibe la liberación tanto de la hormona liberadora de TSH como de TSH mediante retroalimentación negativa.
hormona liberadora
❷ La hormona liberadora hace que la hipófisis anterior secrete la hormona estimuladora de la tiroides (TSH).
células endocrinas de la hipófisis anterior
TSH
tiroides
tiroxina
❸ La TSH hace que la tiroides secrete tiroxina, la cual incremente la tasa metabólica celular en todo el cuerpo.

FIGURA 37-10 Retroalimentación negativa en la función de la glándula tiroides
PREGUNTA: Una prueba común para indagar el funcionamiento de la glándula tiroides es medir la cantidad de hormona estimuladora de la tiroides que circula por la sangre. ¿Qué concluirías si tal prueba revelara un nivel anormalmente elevado de TSH?

excesivo de la tiroides; la glándula crecida puede abultar el cuello, produciendo una condición llamada **bocio** (véase la figura 37-9b). El bocio solía ser común en algunas regiones de Estados Unidos, donde los niveles de yodo son bajos en el suelo y en el agua, pero la generalización del uso de sal yodada prácticamente ha eliminado esta condición en los países desarrollados.

Los cuatro discos pequeños de las **glándulas paratiroides** están incrustados en la parte trasera de la tiroides (véase la figura 37-9a). Las paratiroides secretan la **paratohormona (PTH)** que controla la concentración del calcio en la sangre y en el líquido intersticial. El calcio es indispensable en muchos procesos, como la función muscular y nerviosa, por lo que es preciso mantener la concentración de este ion en los líquidos corporales dentro de límites estrechos. Los huesos sirven como un "banco" en el que se puede depositar o del que se puede retirar calcio cuando es necesario. Si los niveles de calcio en la sangre bajan, la paratohormona provoca la liberación de algo de calcio de los huesos. También hace que los riñones reabsorban más calcio conforme se elabora orina. Un mayor nivel de calcio en la sangre inhibe la posterior liberación de paratohormona en un ciclo de retroalimentación negativa (**FIGURA 37-11**).

bajo nivel de calcio en la sangre
nivel normal de calcio en la sangre
las paratiroides liberan PTH
los huesos liberan calcio

FIGURA 37-11 La retroalimentación negativa regula los niveles de calcio en la sangre

El páncreas es una glándula tanto exocrina como endocrina

El **páncreas** es una glándula que produce secreciones tanto exocrinas como endocrinas. La porción exocrina sintetiza secreciones digestivas que se liberan al *conducto pancreático* y fluyen hacia el intestino delgado (véase el capítulo 34). La porción endocrina consiste en cúmulos de células llamadas **células de islote** que producen hormonas peptídicas. Un tipo de células de islote produce la hormona **insulina**; otro tipo produce la hormona **glucagón**.

La insulina y el glucagón tienen funciones opuestas que regulan el metabolismo de los carbohidratos y las grasas: la insulina reduce el nivel de glucosa en la sangre, en tanto que el glucagón lo eleva (**FIGURA 37-12**). Juntas, las dos hormonas ayudan a mantener casi constante el nivel de glucosa de la sangre. Cuando ese nivel se eleva (por ejemplo, después de comer), se libera insulina, la cual hace que las células del cuerpo absorban glucosa y la metabolicen para obtener energía o la conviertan en grasa *o glucógeno* (un polisacárido constituido de cadenas largas de moléculas de glucosa) para almacenarla. Cuando bajan los niveles de glucosa de la sangre (por ejemplo, si omitimos el desayuno o corrimos una carrera de 10 kilómetros), se libera glucagón, el cual activa una enzima hepática que descompone el glucógeno (que primordialmente está almacenado en el hígado) y libera glucosa a la sangre. El glucagón también promueve la descomposición de lípidos para liberar ácidos grasos que pueden metabolizarse para obtener energía.

Una deficiencia en la producción de insulina o una falla en las células blanco que deben responder a ella produce **diabetes mellitus**. Hay varias causas de la diabetes; pero en todos los casos, los niveles de glucosa en la sangre son elevados y fluctúan con la ingesta de alimento. Por razones que aún no se comprenden del todo, la diabetes provoca una amplia variedad de problemas circulatorios que dan por resultado hipertensión, aterosclerosis y niveles elevados de colesterol LDL (malo). La diabetes indirectamente provoca infartos al miocardio, ceguera y deficiencias renales. Los científicos han insertado el gen humano de la insulina en bacterias y otras células que pueden cultivarse en laboratorios en grandes cantidades, para tener insulina humana fácilmente disponible. Un novedoso tratamiento para esta enfermedad se describe en "Enlaces con la vida: Más cerca de la cura de la diabetes".

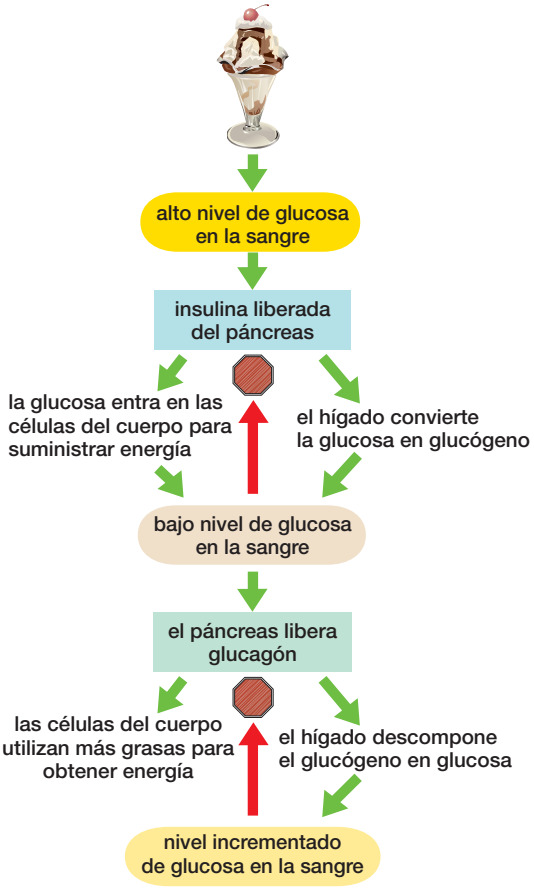

alto nivel de glucosa en la sangre
insulina liberada del páncreas
la glucosa entra en las células del cuerpo para suministrar energía
el hígado convierte la glucosa en glucógeno
bajo nivel de glucosa en la sangre
el páncreas libera glucagón
las células del cuerpo utilizan más grasas para obtener energía
el hígado descompone el glucógeno en glucosa
nivel incrementado de glucosa en la sangre

FIGURA 37-12 El páncreas controla los niveles de glucosa en la sangre
Las células de islote en el páncreas producen insulina y glucagón, los cuales cooperan en un ciclo de retroalimentación negativa de dos partes que controla las concentraciones de glucosa en la sangre. PREGUNTA: ¿Cómo resultará afectado el nivel de glucosa en una persona que nació con una mutación que impide que los receptores de glucagón se unan a este último?

Los órganos sexuales secretan hormonas esteroides

Los órganos sexuales hacen mucho más que producir espermatozoides u óvulos. Los

en la hembra, son órganos endocrinos importantes (véase la figura 37-1). Los testículos secretan varias hormonas esteroides, llamadas colectivamente **andrógenos**, de las cuales la más importante es la **testosterona**. Los ovarios secretan dos tipos de hormonas esteroides: **estrógeno** y **progesterona**. El papel de las hormonas sexuales en la producción de espermatozoides y óvulos, en el ciclo menstrual, el embarazo y el desarrollo se describe en los capítulos 40 y 41.

Las hormonas sexuales también desempeñan un papel clave en la *pubertad*, *la* fase de la vida en la que los aparatos reproductores de uno y otro sexo maduran y se vuelven funcionales. La pubertad va acompañada de cambios conductuales que hacen que resulte una etapa tan interesante para los adolescentes y sus padres. La pubertad se inicia cuando, por razones que aún no se comprenden del todo, el hipotálamo comienza a secretar cantidades cada vez mayores de hormonas liberadoras que a la vez estimulan a la hipófisis anterior para que secrete más hormona luteinizante (LH) y hormona estimuladora del folículo (FSH) al torrente sanguíneo. Tanto la LH como la FSH estimulan a células blanco en los testículos u ovarios para que produzcan niveles más altos de hormonas sexuales. La elevación resultante en las hormonas sexuales en circulación afecta finalmente a tejidos de todo el cuerpo que poseen los receptores apropiados. En los individuos de uno y otro sexo aparece el vello púbico y en las axilas. La testosterona, secretada por los testículos en los hombres, estimula el desarrollo de caracteres sexuales masculinos secundarios, como vello en el cuerpo y la cara, crecimiento muscular y una laringe más grande ("manzana de Adán"), lo que hace más grave la voz. La testosterona también promueve la producción de espermatozoides. El estrógeno de los ovarios en las mujeres estimula el crecimiento de las glándulas mamarias y la maduración del aparato reproductor femenino, incluyendo la producción de óvulos maduros. La progesterona, secretada por los ovarios durante el embarazo, prepara al tracto reproductivo para recibir y nutrir el óvulo fecundado. Aunque hay un aumento repentino de producción de hormonas sexuales durante la pubertad, las hormonas sexuales están presentes desde la etapa fetal. Estas hormonas influyen en el desarrollo de uno y otro sexo y continúan afectando el comportamiento y la función cerebral durante toda la vida.

En las últimas décadas, investigaciones realizadas sobre una amplia variedad de animales, así como algunos estudios de poblaciones humanas, han revelado que contaminantes ambientales comunes procedentes de las actividades agrícolas e industriales alteran los sistemas hormonales. Esto es particularmente cierto en el caso de las hormonas sexuales, como se describe en "Guardián de la Tierra: Engaño endocrino".

Las glándulas suprarrenales tienen dos partes que secretan hormonas distintas

Imaginemos cómo se siente nuestro cuerpo cuando nos sobresaltamos, nos asustamos o nos enojamos. Estas reacciones físicas son resultado de hormonas producidas por las glándulas suprarrenales, que actúan en colaboración con el sistema nervioso simpático que nos prepara para enfrentar situaciones de emergencia. Al igual que la hipófisis y el páncreas, las **glándulas suprarrenales** o **adrenales** (ambos términos significan "sobre los riñones") son dos glándulas en una: la *médula suprarrenal* y la *corteza suprarrenal* (**FIGURA 37-13**). La **médula suprarrenal**

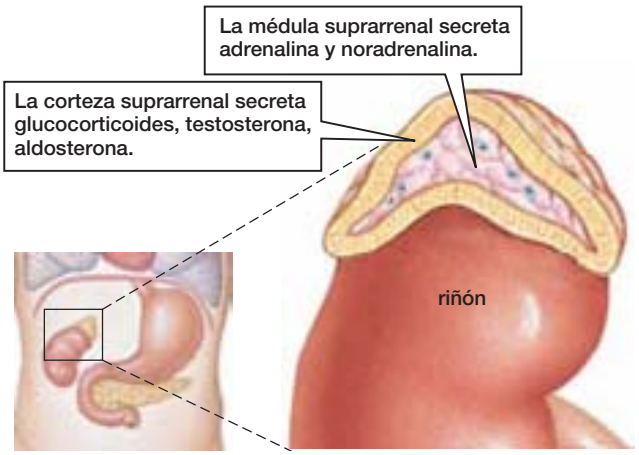

La médula suprarrenal secreta adrenalina y noradrenalina.
La corteza suprarrenal secreta glucocorticoides, testosterona, aldosterona.
riñón

FIGURA 37-13 Las glándulas suprarrenales
Encima de cada riñón hay una glándula suprarrenal. La corteza consta de células endocrinas que secretan hormonas esteroides. La médula interna, derivada de tejido nervioso durante el desarrollo, secreta adrenalina y noradrenalina.

derivadas de tejido nervioso durante el desarrollo; su secreción hormonal está bajo el control directo del sistema nervioso. La médula suprarrenal produce dos hormonas en respuesta a las tensiones: **adrenalina** y, en cantidades mucho menores, **noradrenalina** (también llamadas *epinefrina y norepinefrina*, respectivamente). Estas hormonas, que son derivados de aminoácidos, preparan al cuerpo para acciones de emergencia: elevan los ritmos cardiaco y respiratorio, hacen que suban los niveles de glucosa en la sangre y dirigen el flujo de sangre lejos del tracto digestivo y hacia el cerebro y los músculos. También hacen que los conductos de aire de los pulmones se expandan para que el intercambio de gases sea más eficiente. Por eso se administran sustancias que imitan la acción de la adrenalina a los asmáticos, cuyas vías respiratorias se constriñen durante los ataques que sufren. El sistema nervioso simpático activa a la médula suprarrenal y prepara al cuerpo para responder a emergencias, como veremos en el capítulo 38.

La capa exterior de la glándula suprarrenal forma la **corteza suprarrenal**, que secreta tres tipos de hormonas esteroides, llamadas **glucocorticoides**. ACTH de la hipófisis anterior estimula la liberación de glucocorticoides, en respuesta a una hormona liberadora del hipotálamo. Los niveles hormonales están controlados por retroalimentación negativa; la circulación de los glucocorticoides inhibe la liberación tanto de la hormona liberadora del hipotálamo como de ACTH.

El glucocorticoide **cortisol**

GUARDIÁN DE LA TIERRA Engaño endocrino

Las actividades humanas han introducido una enorme cantidad y variedad de sustancias ajenas en el entorno. Ahora esas sustancias están presentes en el agua, el aire y los alimentos, y todos estamos expuestos a ellas todos los días. Algunas han perturbado varios aspectos de la función reproductora en animales silvestres expuestos a niveles altos. Estos compuestos son muy diversos en cuanto a estructura química y tienen una gama muy amplia de orígenes que incluyen plaguicidas (DDT, metoxiclor), plásticos (bisfenol A, ftalatos), detergentes (nonilfenilo, etoxilato) y procesos industriales (con policloruro de bifenilo, PCB). La preocupación por estos **perturbadores endocrinos** se basa en estudios con animales de laboratorio, cultivos celulares y animales silvestres expuestos que se han observado en su hábitat natural. Algunos provocan una reducción en la hormona tiroidea; otros imitan o bloquean las hormonas reproductoras, dependiendo del sitio de acción o de la especie.

Los científicos han identificado una amplia variedad de efectos nocivos causados por los perturbadores endocrinos; entre ellos están la feminización de los machos, la masculinización de las hembras, cánceres del aparato reproductor, malformaciones en los órganos sexuales, niveles alterados de hormonas en la sangre y reducción de la fertilidad. Cuando una planta química cerca del Lago Apopka en Florida descargó al agua grandes cantidades de varios tipos conocidos de perturbadores de estrógeno, los biólogos que estudiaban la fauna notaron una alarmante disminución en la población de caimanes del lago. Se observó que muchos huevos no estaban eclosionando. Los machos tenían niveles altos de estrógeno, niveles bajos de testosterona, penes más pequeños de lo normal y testículos anormales. Las hembras por lo regular presentaban niveles excepcionalmente altos de estrógeno y ovarios anormales. En otro estudio, los investigadores descubrieron que peces macho de agua dulce que viven corriente abajo de las descargas de aguas negras tanto en Estados Unidos como en Inglaterra producen una proteína de la yema de huevo que normalmente se encuentra sólo en las hembras. Los investigadores sospechan que esta feminización de los machos es causada por los estrógenos humanos (tanto naturales como sintéticos, estos últimos provenientes de las píldoras anticonceptivas) que se excretan en la orina de las mujeres. Hay una creciente preocupación en torno a dos nuevas formas de control natal: los parches anticonceptivos y los anillos vaginales, los cuales retienen altos niveles de estrógeno sintético después de utilizarse y se tiran en el retrete o terminan en los vertederos de basura, de donde el estrógeno se dirige hacia los ríos o las aguas subterráneas.

Algunos de los perturbadores endocrinos más devastadores, como el DDT y los PCB, se han prohibido en los países desarrollados (aunque permanecen en el aire, el agua o el suelo), pero muchos otros todavía se usan ampliamente y son muy persistentes en el entorno. Conforme se realiza más investigación sobre sustancias químicas, se descubre que algunos de ellos son perturbadores endocrinos. El atrazín, un compuesto utilizado ampliamente en Estados Unidos para exterminar la maleza, causa una disminución en los niveles de testosterona así como anormalidades sexuales en las ranas en concentraciones que son comunes en los ríos y que están muy por debajo de los niveles máximos permitidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. El atrazín y otros perturbadores endocrinos podrían estar contribuyendo a una disminución en la población mundial de anfibios y a la reciente extinción de varias especies.

Es probable que los efectos de los perturbadores endocrinos se extiendan a los seres humanos. Los científicos están investigando un posible vínculo entre los herbicidas, que se encuentran dispersos en ríos y aguas subterráneas en la zona central norte de Estados Unidos, y una menor calidad del semen en los seres humanos. Recientemente los éteres difenílicos polibromados (PBDE), que se utilizan como retardadores de flamas en productos manufacturados como computadoras, plásticos, alfombras y muebles, se han filtrado al aire, agua y a productos que sirven de alimento al ser humano; por eso se les encuentra en la leche materna. Aunque los niveles de estas sustancias en las personas son ínfimos, los efectos en los seres humanos aún se desconocen; la investigación con animales revela que la toxicidad es similar a la que provocan los PCB, que causan daño en el sistema nervioso y defectos congénitos tanto en animales como en seres humanos. Se cree que tanto los PCB como los PBDE alteran las funciones de la tiroides.

Aunque se sabe que los niveles altos de perturbadores endocrinos son nocivos, nadie sabe qué efectos tendrá sobre las poblaciones humanas y de otros animales la exposición a largo plazo a niveles bajos de estas sustancias (por sí solas y en diversas combinaciones), en especial durante las primeras y más vulnerables etapas del desarrollo. ¿Cuántos de los miles de compuestos industriales de uso común actúan como perturbadores endocrinos? ¿Cómo actúan? ¿Qué niveles de exposición experimentan diversas poblaciones humanas y animales? ¿Existe un umbral de exposición más allá del cual se presentan efectos tóxicos? ¿La exposición a múltiples perturbadores endocrinos produce efectos más graves que los que provocan esas mismas sustancias químicas por separado? Las respuestas a estas preguntas nos ayudarán a formular controles apropiados para su uso. Por desgracia, las preguntas son complejas y difíciles y, mientras buscamos las respuestas, cada vez más y más de estas sustancias están ingresando en el entorno.

quemar glucosa. Por ello, no puede permitirse que los niveles de glucosa de la sangre bajen demasiado, pues en poco tiempo las células del cerebro experimentarían inanición y esto daría pie a pérdida del conocimiento y la muerte.

La corteza suprarrenal también secreta la hormona **aldosterona**

nes y las glándulas sudoríparas retengan el sodio. Entonces la sal y otras fuentes de sodio de la dieta elevan los niveles de este último en la sangre y detienen la secreción de aldosterona (un ejemplo de retroalimentación negativa).

La corteza suprarrenal también produce la hormona sexual masculina testosterona, tanto en hombres como en mujeres, aunque normalmente en cantidades mucho más bajas que la que producen los testículos. Los tumores de la médula suprarrenal pueden causar una liberación excesiva de testosterona, causando masculinización en las mujeres. Muchas de las "mujeres barbudas", que solían exhibirse en las atracciones secundarias de los circos, probablemente padecían esta condición.

Otras fuentes de hormonas comprenden la glándula pineal, el timo, los riñones, el corazón, el tracto digestivo y las células grasas

La **glándula pineal** se encuentra entre los dos hemisferios del cerebro, justo arriba y atrás del hipotálamo (véase la figura 37-1). Esta glándula, cuyo nombre se debe a su parecido con los conos de los pinos, es más pequeña que un chícharo. En 1646 el filósofo René Descartes la describió como "la sede del alma racional". Desde entonces, los científicos han aprendido más acerca de esta glándula, pero todavía no se conocen bien muchas de sus funciones.

La glándula pineal produce la hormona **melatonina**, un derivado de aminoácido. La melatonina se secreta en un ritmo diario, que en los mamíferos está regulado por los ojos. En algunos vertebrados, como la rana, la glándula misma contiene células fotorreceptoras y el cráneo arriba de ella es delgado, de manera que la pineal puede detectar la luz solar y, por lo tanto, la duración del día. Se cree que la glándula pineal, al responder a las duraciones del día características de las distintas estaciones, regula los ciclos reproductivos estacionales de muchos mamíferos. Pese a años de investigaciones, no se ha aclarado completamente la función de la glándula pineal y de la melatonina en el ser humano; pero se sabe que la oscuridad incrementa la producción de melatonina, mientras que la luz la inhibe. Una hipótesis es que la glándula pineal y la secreción de melatonina influyen en los ciclos de sueño-vigilia. La melatonina se vende como ayuda para conciliar el sueño. Una sobreproducción de melatonina podría contribuir a generar la depresión que algunas personas experimentan durante los días cortos del invierno, conocida como *trastorno afectivo estacional* (*seasonal affective disorder*, SAD). Sentarse frente a una serie de luces brillantes en la mañana ayuda a aminorar los síntomas del SAD en muchos casos.

El **timo** se encuentra en la cavidad torácica detrás del esternón (véase la figura 37-1). Además de producir glóbulos blancos, el timo produce la hormona **timosina**, que estimula el desarrollo de glóbulos blancos especializados (células T), los cuales desempeñan un papel importante en el sistema inmunitario (véase el capítulo 36). El timo es extremadamente grande en los niños, pero, por influencia de las hormonas sexuales, comienza a encogerse después de la pubertad.

Los riñones, que desempeñan un papel central en el mantenimiento de la homeostasis de los líquidos del cuerpo, son también importantes órganos endocrinos. Cuando baja el contenido de oxígeno de la sangre, los riñones producen la hormona que incrementa la producción de glóbulos rojos (véase el capítulo 32). Los riñones también producen una segunda hormona, la **renina**, en respuesta a una presión arterial baja, como la causada por una hemorragia. La renina es una enzima que cataliza la producción de la hormona **angiotensina** a partir de proteínas de la sangre. La angiotensina eleva la presión arterial constriñendo las arteriolas; también estimula la liberación de aldosterona por la corteza suprarrenal, la cual hace que los riñones retengan sodio, lo que a la vez aumenta la osmolaridad. Una osmolaridad alta atrae y retiene agua, lo que incrementa el volumen de la sangre.

Si bien parece poco probable que el corazón sea un órgano endocrino, en 1981 se descubrió que una sustancia que se extraía del tejido de las aurículas del corazón y se inyectaba en ratas causaba un incremento en la producción de sal y agua por los riñones. Esta sustancia es el **péptido auricular natriurético (ANP)**. Las células de las aurículas liberan este péptido cuando el volumen sanguíneo aumenta y hace que el corazón se distienda excesivamente. El péptido auricular natriurético produce entonces una reducción en el volumen sanguíneo al inhibir la liberación tanto de ADH como de aldosterona, permitiendo que los riñones excreten más sal y agua.

El estómago y el intestino delgado producen diversas hormonas peptídicas que ayudan a regular la digestión. Entre ellas están la **gastrina**, **secretina** y **colecistocinina**, de las que hablamos en el capítulo 34.

¿Las células adiposa pueden constituir un órgano endocrino? En 1995 ciertos investigadores describieron la hormona peptídica **leptina** (derivada de la palabra griega "leptos", que significa delgado) liberada por células adiposas (de grasa). Los ratones a los que les falta el gen de la leptina se vuelven obesos (**FIGURA 37-14**), e inyecciones de leptina hacen que pierdan peso. Los investigadores postularon que el tejido adiposo, al liberar leptina, indica al cuerpo cuánta grasa ha almacenado y, por ende, cuánto debe comer. Por desgracia, los resultados de las pruebas realizadas con leptina como ayuda para que las personas pierdan peso no son alentadores. Muchas personas obesas tienen niveles altos de leptina, pero al parecer son relativamente insensibles a ella. No obstante, se están descubriendo nuevas y sorprendentes funciones de la leptina y se están encontrando receptores de leptina en lugares inesperados, como en vasos sanguíneos y glóbulos blancos. Al parecer, la leptina estimula el crecimiento de nuevos capilares y acelera la cicatrización de heridas. También estimula al sistema inmunitario y parece ser necesaria para el inicio de la pubertad.

FIGURA 37-14 La leptina ayuda a regular la grasa corporal
El ratón de la izquierda se alteró por ingeniería genética, de manera que carece del gen para la hormona leptina.

ENLACES CON LA VIDA

Más cerca de la cura de la diabetes

En la forma más común de diabetes, conocida como *tipo 2*, el páncreas produce algo de insulina, pero no la suficiente, o bien, las células de la víctima pierden su capacidad para responder a ella (condición conocida como resistencia a la insulina). Si bien las causas aún no se comprenden del todo, existe una clara correlación entre la diabetes tipo 2, caracterizada por resistencia a la insulina, y la obesidad. Los índices de obesidad se han duplicado desde 1980, y la incidencia de la diabetes tipo 2 se ha duplicado desde 1970. Esta forma de diabetes por lo general se presenta en personas mayores de 40 años; pero cada vez más niños reciben un diagnóstico de diabetes, en paralelismo con el incremento de la obesidad durante la niñez.

Mientras que la diabetes tipo 2 a menudo puede controlarse mediante mejoras en la dieta y el estilo de vida, la diabetes tipo 1 se presenta cuando el sistema inmunitario de una persona ataca y mata las células de islote que producen insulina en el páncreas. Esta forma de diabetes a menudo se manifiesta muy temprano en la vida, y sus víctimas rara vez son longevos. Sus vidas nunca son normales, pues tienen que practicarse múltiples pruebas de sangre y aplicarse inyecciones de insulina todos los días. Para el millón de personas en Estados Unidos que sufren de este tipo de diabetes, el trasplante de células de islote representa un rayo de esperanza. Un equipo de investigadores encabezado por James Shapiro en la Universidad de Alberta, Canadá, retiró el páncreas del cuerpo de donadores recientemente fallecidos e implantó las células de islote extraídas en una vena que alimentaba el hígado de víctimas de diabetes. Algunas de estas células se aposentaron en los receptores y comenzaron a secretar insulina. Cinco años después, la mayoría de estas personas aún requieren de insulina, pero en menores dosis, y sus niveles de azúcar en la sangre son más estables. Por desgracia, deben tomar medicamentos inmunosupresores de manera continua para evitar el rechazo de tejidos.

Sólo unos 3000 donadores de páncreas están disponibles cada año en Estados Unidos, y la mayoría de los transplantes exitosos de células de islote requieren de dos donadores de páncreas porque estas frágiles células se dañan al almacenarse en lugares fríos y durante el tiempo de transporte. Recientemente, los médicos realizaron el primer trasplante de células de islote procedentes de un donador vivo; una mujer donó parte de su páncreas a su hija adulta. Las células trasplantadas comenzaron a fabricar insulina de inmediato, lo que dio a los médicos esperanza de que las células de los donadores vivos, que suelen ser sanas, puedan dar un mejor resultado que las procedentes de cadáveres. Sólo el tiempo lo dirá.

Las investigaciones siguen expandiendo nuestra comprensión de los múltiples efectos de las hormonas y de la amplia variedad de órganos y células que las producen. Con el tiempo, esta comprensión dará origen a un sinnúmero de nuevos tratamientos médicos, pero también deberá aumentar nuestro respeto por estas sustancias y nuestra conciencia de que cualquier hormona que tomemos podría influir en sistemas fisiológicos de todo nuestro cuerpo.

CONEXIONES EVOLUTIVAS

La evolución de las hormonas

en el agua salada, el pez tiende a perder agua. Por consiguiente, las migraciones del salmón requieren una readaptación total del control de la sal y el agua. En el salmón, una de las funciones de la tiroxina es generar los cambios metabólicos necesarios para pasar de la vida en ríos y arroyos a la vida en el océano, y de regreso.

En los anfibios la tiroxina tiene el impresionante efecto de activar la metamorfosis. En 1912, en una de las primeras demostraciones de la acción de cualquier hormona, se alimentó a renacuajos con tiroides de caballo picada. El resultado fue que los renacuajos sufrieron una metamorfosis prematura para convertirse en ranas adultas miniatura (**FIGURA 37-15**

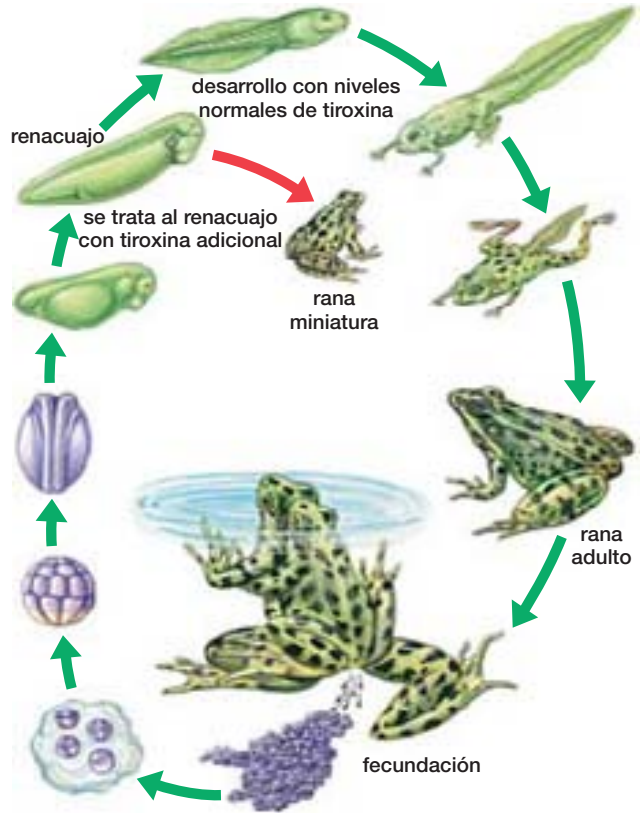


FIGURA 37-15 La tiroxina controla la metamorfosis en los anfibios
El ciclo de vida de la rana inicia con la fecundación de los óvulos (abajo). El huevo fecundado se convierte en un renacuajo acuático semejante a un pez, que crece y finalmente sufre metamorfosis para convertirse en una rana adulta. La metamorfosis se activa con un aumento en la producción de tiroxina por la glándula tiroides del renacuajo. Si se inyecta tiroxina adicional a un renacuajo joven, sufrirá una metamorfosis anticipada para convertirse en una rana adulta en miniatura. PREGUNTA: ¿Qué sucedería si se administrara a los renacuajos una sustancia que bloquea la producción de tiroxina?

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

PERDER POR EL USO DE HORMONAS ARTIFICIALES

Los atletas dispuestos a engañar se sienten atraídos por los esteroides anabólicos porque, al igual que la testosterona natural, aumentan la masa muscular. Las hormonas han evolucionado hasta poder ejercer su efecto en las actuales cantidades minúsculas, en los momentos adecuados y en un cuerpo que se desarrolla y funciona normalmente. Tomar dosis relativamente grandes de esteroides anabólicos puede significar un problema porque, como sucede con muchas hormonas, ejercen sus efectos en todo el cuerpo.

En los hombres, niveles artificialmente aumentados de esteroides anabólicos generan un efecto de retroalimentación negativa que puede reducir la producción natural de testosterona, reducir el tamaño de los testículos y el conteo de espermatozoides, así como provocar el crecimiento del pecho. En las mujeres, los esteroides anabólicos interfieren con los periodos menstruales y aumentan el vello facial. En ambos sexos, los esteroides provocan acné e inhiben el funcionamiento del sistema inmunitario. Los cambios continuos de humor y la agresividad repentina son tan comunes en quienes consumen esteroides anabólicos, que en inglés existe el término "roid rage" ("rabia por esteroides") para designar esta condición. Los esteroides anabólicos se han vinculado con aumentos en la presión sanguínea y con una disminución del colesterol bueno (HDL); ambos son factores de riesgo para sufrir infartos al miocardio y accidentes cerebrovasculares. Con base en una gran encuesta, los Centros para el Control de Enfermedades (CDC) concluyeron que aproximadamente un 6 por ciento de los estudiantes de preparatoria en Estados Unidos habían utilizado esteroides anabólicos alguna vez. Como los esteroides anabólicos pueden causar que el crecimiento de los huesos se interrumpa prematuramente, los jóvenes que abusan de estas sustancias quizá no alcancen nunca su máxima estatura.

Jugadores profesionales de fútbol y béisbol han deshonrado sus actividades deportivas tomando THG. El Tour de Francia de 2006 perdió buena parte de su brillo cuando nueve ciclistas fueron expulsados antes de que comenzara la carrera, con base en indicios de que habían tomando fármacos para mejorar el desempeño. Algunos participantes en justas olímpicas han sido despojados de sus medallas. Para Catlin, quien está a cargo del Laboratorio Olímpico de Análisis, la profanación de los Juegos Olímpicos es especialmente trágica. Y afirma: "La imagen que tengo de los Juegos Olímpicos es la del más puro y limpio evento que haya habido jamás. La gente en todos los países del mundo puede competir y el mejor hombre o la mejor mujer cruza la línea final antes que todos. ¿Qué podría ser peor que pensar que su comportamiento es deshonroso?"

Piensa en esto De acuerdo con lo que sabes acerca de los esteroides y otras hormonas, ¿crees que los atletas de los niveles de preparatoria y universidad deberían someterse rutinariamente a pruebas, al igual que lo hacen los atletas olímpicos? Explica tu respuesta.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

37.1 ¿Cómo se comunican las células animales?
Dentro de los organismos multicelulares, la comunicación entre células ocurre a través de las uniones abiertas que unen células directamente, por difusión de sustancias químicas a las células circunvecinas (hormonas locales y neurotransmisores), y por transporte de sustancias en el torrente sanguíneo (hormonas en-

docrinas). Los mensajeros químicos extracelulares actúan selectivamente sobre células blanco que llevan consigo receptores específicos para esa sustancia.

37.2 ¿Qué características tienen las hormonas animales?

La mayoría de las células liberan hormonas locales, como las prostaglandinas, para comunicarse con las células vecinas. El sistema endocrino es un conjunto de glándulas y órganos que liberan hormonas endocrinas, las cuales son transportadas en el torrente sanguíneo a otras partes del cuerpo; ahí, afectan la actividad de células blanco específicas que llevan consigo receptores para las hormonas. Las hormonas son sintetizadas ya sea a partir de aminoácidos (hormonas derivadas de aminoácidos y péptidos) o a partir de lípidos (hormonas esteroides).

Casi todas las hormonas actúan sobre sus células blanco en una de dos maneras. Las hormonas peptídicas y derivadas de aminoácidos se unen a receptores en la superficie de las células blanco y activan a segundos mensajeros intracelulares, como el AMP cíclico, que a la vez alteran el metabolismo de la célula. Las hormonas esteroides se pueden unir a receptores superficiales o bien atravesar por difusión la membrana plasmática de su célula blanco y unirse a receptores en el citosol o el núcleo. El complejo hormona-receptor se dirige al núcleo y promueve la transcripción de genes específicos dentro del núcleo. Las hormonas tiroideas también penetran la membrana plasmática y entran en el núcleo, donde se unen a receptores asociados a los cromosomas e influyen en la transcripción de genes.

La acción hormonal generalmente se regula por retroalimentación negativa, un proceso en el que una hormona causa cambios que inhiben la secreción ulterior de esa hormona.

37.3 ¿Qué estructuras y hormonas constituyen el sistema endocrino de los mamíferos?

Las hormonas son producto de las glándulas endocrinas: cúmulos de células incrustadas en una red de capilares. Las hormonas se secretan al líquido extracelular y se difunden al interior de los capilares. Las principales glándulas endocrinas del cuerpo humano son el complejo hipotálamo-hipófisis, las glándulas tiroides y paratiroides, el páncreas, los órganos sexuales y las glándulas suprarrenales. Las hormonas secretadas por estas glándulas y sus acciones se resumen en la tabla 37-3. Otras estructuras que producen hormonas son la glándula pineal, el timo, los riñones, el corazón, el estómago, el intestino delgado y las células grasas.

Web tutorial 37.1 El control que ejerce el hipotálamo sobre la hipófisis

Web tutorial 37.2 Cómo influyen las hormonas en las células blanco

TÉRMINOS CLAVE

adrenalina *pág. 753*
aldosterona *pág. 754*
AMP cíclico *pág. 744*
andrógeno *pág. 753*
angiotensina *pág. 755*
bocio *pág. 752*
célula blanco *pág. 743*
célula de islote *pág. 752*
célula neurosecretora *pág. 748*
colecistocinina *pág. 755*
conducto *pág. 746*
corteza suprarrenal *pág. 753*
cortisol *pág. 753*
diabetes mellitus *pág. 752*
ecdisona *pág. 746*
eritropoyetina *pág. 755*
estrógeno *pág. 753*
gastrina *pág. 755*
glándula endocrina *pág. 746*
glándula exocrina *pág. 746*
glándula hipófisis *pág. 748*
glándula paratiroides *pág. 752*
glándula pineal *pág. 755*
glándula suprarrenal *pág. 753*
glándula tiroides *pág. 750*
glucagón *pág. 752*
glucocorticoide *pág. 753*
hipófisis anterior *pág. 748*
hipófisis posterior *pág. 748*
hipotálamo *pág. 748*
hormona adrenocorticotrópica (ACTH) *pág. 749*
hormona antidiurética (ADH) *pág. 750*
hormona del crecimiento *pág. 749*
hormona derivada de aminoácido *pág. 742*
hormona endocrina *pág. 742*
hormona esteroide *pág. 742*
hormona estimuladora de la tiroides (TSH) *pág. 749*
hormona estimuladora de melanocitos (MSH) *pág. 749*
hormona estimuladora del folículo (FSH) *pág. 749*
hormona inhibidora *pág. 749*
hormona liberadora *pág. 749*
hormona local *pág. 742*
hormona luteinizante (LH) *pág. 749*
hormona peptídica *pág. 742*
insulina *pág. 752*
leptina *pág. 755*
médula suprarrenal *pág. 753*
melatonina *pág. 755*
noradrenalina *pág. 753*
ovario *pág. 752*
oxitocina *pág. 746*
páncreas *pág. 752*
paratohormona (PTH) *pág. 752*
péptido auricular natriurético (ANP) *pág. 755*
perturbador endocrino *pág. 754*
progesterona *pág. 753*
prolactina *pág. 749*
prostaglandina *pág. 742*
receptor *pág. 742*
renina *pág. 755*
secretina *pág. 755*
segundo mensajero *pág. 744*
sistema endocrino *pág. 743*
testículos *pág. 752*
testosterona *pág. 753*
timo *pág. 755*
timosina *pág. 755*
tiroxina *pág. 750*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. ¿Cuáles son los tres tipos de moléculas que se usan como hormonas en los vertebrados? Cita un ejemplo de cada uno.
2. ¿Qué diferencia hay entre una glándula endocrina y una exocrina? ¿Qué tipo libera hormonas?
3. Cuando una hormona peptídica se une a receptores de la célula blanco, ¿qué sucesos celulares tienen lugar? ¿Cómo se comportan las hormonas esteroides?
4. Traza un diagrama del proceso de retroalimentación negativa y da un ejemplo en el control de la acción hormonal.
5. ¿Cuáles son las principales glándulas endocrinas del cuerpo humano y dónde están?
6. Describe la estructura del complejo hipotálamo-hipófisis. ¿Qué hormonas de la hipófisis son neurosecretoras? ¿Qué funciones tienen?
7. Describe cómo las hormonas liberadoras regulan la secreción de hormonas por las células de la hipófisis anterior. Menciona las hormonas de la hipófisis anterior e indica una función de cada una.
8. Describe cómo las hormonas del páncreas colaboran para regular la concentración de glucosa en la sangre.
9. Compara la corteza y la médula suprarrenales contestando estas preguntas: ¿Dónde se encuentran dentro de la glándula suprarrenal? ¿Qué hormonas producen? ¿Qué órganos son el blanco de sus hormonas?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Una estudiante decide hacer un proyecto de ciencia sobre el efecto de la tiroides en la metamorfosis de las ranas. Ella prepara tres acuarios con renacuajos y agrega tiroxina al agua de uno de ellos, añade el fármaco tiouracilo al segundo, y no añade nada al tercero. El tiouracilo reacciona con la tiroxina en los renacuajos y produce un compuesto inactivo. Suponiendo que la estudiante usa concentraciones fisiológicamente apropiadas, pronostica lo que sucederá.
2. Si tuvieras diabetes severa tipo 1, ¿considerarías el trasplante de células de islote? ¿Qué ventajas y desventajas le encuentras?
3. Sugiere una hipótesis acerca del sistema endocrino para explicar por qué muchas aves ponen sus huevos en la primavera y por qué los avicultores mantienen las luces encendidas durante la noche en el lugar donde albergan a sus aves ponedoras.
4. Algunos padres interesados en becas deportivas universitarias para sus hijos están pidiendo a los médicos prescribir tratamientos con hormona del crecimiento, aun cuando sus hijos tienen estatura normal. ¿Qué problemas biológicos y éticos supone esto para los padres, hijos, médicos, entrenadores y consejos de becas universitarias?
5. Presenta argumentos en favor y en contra de prohibir o restringir el uso de perturbadores endocrinos comunes, como los plastificantes y ciertos plaguicidas. ¿Qué acuerdos puedes sugerir al respecto?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Ashley, S. "Doping by Design". *Scientific American*, febrero de 2004. Nuevos tipos de "esteroides diseñados" son difíciles de detectar.

Christensen, D. "Transplanted Hopes". *Science News*, 2 de septiembre de 2000. El autor describe trasplantes exitosos de células de islote en pacientes diabéticos.

Raloff. J. "Common Pollutants Undermine Masculinity". *Science News*, 3 de abril de 1999. Varios artículos de investigaciones recientes reportan efecto de feminización de los perturbadores de estrógeno en animales de laboratorio.

Schubert, C. "Burned by Flame Retardants?" *Science News*, 13 de octubre de 2001. Los retardadores de flama de televisores, computadoras, cortinas y sofás se están acumulando en nuestros cuerpos.

Vogel, G. "A Race to the Starting Line". *Science*, 30 de julio de 2004. Este artículo describe la competencia entre los atletas que toman fármacos y los químicos que idean formas de detectarlos.